

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Měřicí pracoviště pro šíření rádiových signálů uvnitř budov

Measuring Workplace for Radio Signals Propagation Inside Buildings

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Tomáš Jerga

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2612T059 Mobilní technologie

Téma:

Měřicí pracoviště pro šíření rádiových signálů uvnitř budov
Measuring Workplace for Radio Signals Propagation Inside Buildings

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je vytvoření měřicího pracoviště pro testování šíření rádiových signálů sítí WiFi a sítí 2G až 4G přes překážky.

1. Teoretický rozbor problematiky šíření rádiových signálů v pásmu UHF uvnitř budov.
2. Návrh a praktická realizace měřicího pracoviště pro měření rádiových signálů sítí WiFi a sítí 2G až 4G.
3. Proměření vlivu minimálně třech různých typů překážek (skleněná, dřevěná a sádkartonová příčka) na šíření rádiových signálů.
4. Rozbor naměřených dat.

Seznam doporučené odborné literatury:

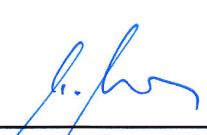
Pechač P.: Šíření vln v zástavbě, BEN, 2005, ISBN: 80-7300-186-1

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

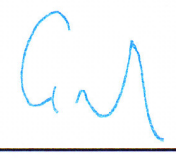
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Roman Šebesta, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární
prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 28. dubna 2017

..........

Rád bych na tomto místě poděkoval Ing. Romanu Šebestovi PhD. za jeho věcné připomínky a rady při psaní této diplomové práce

Abstrakt

Cílem této práce je popsat šíření signálu v pásmu UHF, navrhnout a zkonstruovat měřící pracoviště pro měření rádiového signálu uvnitř budov. Dále se pomocí pracoviště změří útlum signálu přes tři typy překážek, často používaných v interiéru. Jedná se o sádkartón, dřevěnou desku a izolační pokovené dvojsklo. Útlum je změřen pomocí spektrálního analyzátoru v režimu síťového analyzátoru za pomoci dvou portové kalibrace. Naměřené hodnoty se pak porovnaly s očekávanými výstupy z volně dostupných zdrojů.

Klíčová slova: pásmo UHF, útlum signálu, měřící pracoviště, rádiový signál, zástavba

Abstract

The aim of this thesis is to describe propagation of signal in UHF band, design and construct the measuring workplace for measuring the radio signal inside buildings. Through constructed workplace signal attenuation is measured accross three types of barriers, often used in the interior. It is a drywall, wooden board and insulating float glass with metallised coating. Attenuation is measured using a spectrum analyzer network analyzer mode using two-port calibration. The measured values are then compared with the expected outputs from publicly available sources.

Key Words: UHF band, attenuation of signal, measuring workplace, radio signal, buildings

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	8
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	12
1 Úvod	13
2 Základní pojmy pro šíření vln	14
2.1 Elektromagnetická vlna	14
2.2 Klasifikace rádiových vln	15
2.3 Decibel	15
2.4 Vyzařování elektromagnetické vlny	16
2.5 Fresnelova zóna	17
2.6 Odraz a lom vlny	19
2.7 Ohyb	20
2.8 Rozptyl	20
3 Šíření rádiových vln v zástavbě	22
3.1 Šíření vln v pásmu UHF	22
3.2 Šíření ve volném prostoru	23
3.3 Úniky	24
3.4 Vícecestné šíření	25
3.5 Šíření signálu uvnitř budov	26
4 Modely šíření vln	28
4.1 Klasifikace modelů šíření vln v zástavbě	28
4.2 Základní empirický model	29
4.3 One-Slope model	30
4.4 Multi-Wall model	30
5 Telekomunikační systémy využívající pásmo UHF	32
5.1 GSM	32
5.2 UMTS	33
5.3 LTE	34
5.4 Wi-Fi	34

6	Návrh a konstrukce měřicího pracoviště	36
6.1	Návrh plechového boxu	36
6.2	Konstrukce plechového boxu	39
6.3	Řešení boxu s využitím absorbérů	41
7	Příprava pro měření vlivu překážek na rádiový signál	45
7.1	Výběr překážek	45
7.2	Metodika a optimalizace měření	46
7.3	Použitá zařízení	50
8	Praktické měření vlivu překážek na rádiový signál	53
8.1	Měření útlumu sádrokartonové desky	53
8.2	Měření útlumu dvou sádrokartonových desek	56
8.3	Měření útlumu dřevěné desky	57
8.4	Měření izolačního dvojskla	58
8.5	Měření metodikou signálového generátoru a spektrálního analyzátoru	59
9	Vyhodnocení naměřených dat	61
9.1	Srovnání s očekávanými výstupy	62
10	Závěr	65
	Literatura	67
	Přílohy	70

Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka	Anglický význam	Český význam
AOA	<i>Angle Of Arrival</i>	Úhel dopadu
AOD	<i>Angle Of Departure</i>	Úhel odchodu
AP	<i>Access Point</i>	Přístupový bod
ARFCN	<i>Absolute Radio Frequency Channel Number</i>	Identifikační číslo kanálu GSM
AuC	<i>Authentication Centre</i>	Centrum autenticity
BSC	<i>Base Station Controller</i>	Základnová řídicí jednotka
BSS	<i>Base Station Subsystem</i>	Subsystém základnových stanic
BTS	<i>Base Transceiver Service</i>	Základnová stanice
CN	<i>Core Network</i>	Páteří síť
EARFCN	<i>E-UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number</i>	Identifikační číslo kanálu LTE
EIR	<i>Equipment Identity Register</i>	Registr mobilních stanic
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>	Evropský institut pro telekomunikační normy
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>	Duplex s frekvenčním dělením
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>	Vícenásobný přístup s frekvenčním dělením
FSL	<i>Free Space Loss</i>	Ztráty šířením volným prostorem
GMSK	<i>Gaussian Minimum-Shift Keying</i>	Digitální fázová modulace s Gaussovským posunem
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>	Globální systém pro mobilní komunikaci
HLR	<i>Home Location Register</i>	Domovský lokační registr
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>	Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství
IMEI	<i>International Mobile Equipment Identity</i>	Identifikátor mobilního zařízení
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>	Pásmo pro vysílání v průmyslových, vědeckých a zdravotnických oborech
LTE	<i>Long-Term Evolution</i>	Dlouhodobá evoluce
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>	Více vstupů více výstupů
MSC	<i>Mobile Switching Centre</i>	Radiotelefonní ústředna

NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>	Národní institut standardů a technologií
NMC	<i>Network Management Centre</i>	Centrum Managementu
NSS	<i>Network and Switching Subsystem</i>	Síťový a přepínací subsystém
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>	Vícenásobný přístup pomocí ortogonálních frekvencí
OMC	<i>Operation and Maintenance Centre</i>	Provozní a servisní centrum
OSS	<i>Operation Support Subsystem</i>	Operační podpůrný subsystém
RL	<i>Return Loss</i>	Ztráty odrazem
RNC	<i>Radio Network Controller</i>	Řídící jednotka sítě
SC-FDMA	<i>Single Carrier - Frequency Division Multiple Access</i>	Vícenásobný přístup pomocí frekvenčního dělení jedné nosné
SMSC	<i>Short Message Service Centre</i>	Centrum krátkých textových zpráv
TDD	<i>Time Division Duplex</i>	Duplex s časovým dělením
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>	Vícenásobný přístup s časovým dělením
TEM	<i>Transverse Electromagnetic</i>	Transverzálně elektromagnetická vlna
TRAU	<i>Transcoder and Rate Adaptor Unit</i>	Transkódovací jednotka
UARFCN	<i>UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number</i>	Identifikační číslo kanálu UMTS
UE	<i>User Equipment</i>	Uživatelský terminál
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>	Ultra krátké vlny
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>	Univerzální mobilní komunikační systém
USIM	<i>Universal Subscriber Identity Module</i>	Univerzální účastnická identifikační karta
UTRAN	<i>UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>	Rádiová přístupová síť
VLR	<i>Visitor Location Register</i>	Návštěvnický lokační register
WCDMA	<i>Wide Code Division Multiple Access</i>	Širokopásmový vícenásobný přístup s kódovým dělením
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>	Bezdrátová místní síť
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>	Bezdrátová osobní síť

Seznam obrázků

2.1	Znázornění šíření elektromagnetické vlny [3]	14
2.2	Označení frekvenčních pásem dle ČSN IEC 60050-713 [1]	15
2.3	Znázornění blízkého a vzdáleného pole [7]	17
2.4	Typické zobrazení Fresnelovy zóny [8]	17
2.5	Geometrická představa Fresnelových zón [1]	18
2.6	Znázornění odrazu rovinné vlny od rovinného prostředí [1]	19
2.7	Princip šíření vln do oblasti stínu za překážkou [1]	20
2.8	Rozptyl vlny na kulové částici: a) Rayleighův rozptyl na velmi malé částici; b) Mieův rozptyl na menší částici; c) Mieův rozptyl na velké částici [1]	20
3.1	Prostorová klasifikace elektromagnetických vln pro pozemní rádiové spoje [4] . .	22
3.2	Průběh spádové křivky s vyznačením Fresnelova zlomu (tenké čáry – přesný výpočet pro obě polarizace, silné čáry - aproximace) [4]	26
3.3	Znázornění vlivu překážek na přenos signálu [9]	27
4.1	Šíření elektromagnetické vlny v zástavbě [4]	28
5.1	Architektura GSM [14]	33
6.1	Znázornění hranice blízkého a vzdáleného pole vyzařované vybranou anténou a pro frekvenci 1710 MHz (pohled na pracoviště - nárys)	38
6.2	Znázornění 1. a 2. Fresnelovy zóny pro frekvenci 1710 MHz a vzdálenosti od překážek d_1 a d_2 46 cm (pohled na pracoviště - nárys)	39
6.3	Složené měřicí pracoviště	41
6.4	Příklad plochého vícevrstvého pěnového absorbéru [28]	43
6.5	Příklad pyramidového absorbéru s výškou jehlanů 5 cm [28]	43
6.6	Příklad magnetických absorbéru [28]	44
7.1	Vybrané typy překážek, zleva: sádrokarton, dřevěné desky, izolační dvojsklo . . .	46
7.2	Schéma pracoviště měření signálu přes překážku při použití spektrálního analyzátoru s funkcí „Tracking Generator“	49
7.3	Schéma pracoviště měření signálu přes překážku při použití signálového generátoru a spektrálního analyzátoru	50
7.4	Anténa Paoli 680 [32]	51
7.5	Spektrální analyzátor Rhode & Schwarz FSH8 [33]	52
7.6	Signálový generátor Rhode & Schwarz SMB 100 A [34]	52
8.1	Znázornění naměřených útlumů přes sádrokartonovou desku s optimalizací plechovým profilem	54
8.2	Znázornění naměřených útlumů přes sádrokartonovou desku s optimalizací přídavným mezikusem	56
8.3	Znázornění naměřených útlumů přes dvě sádrokartonové desky s optimalizací přídavným mezikusem	56

8.4	Znázornění naměřených útlumů přes dřevěnou desku s optimalizací plechovým profilem	57
8.5	Znázornění naměřených útlumů přes dřevěnou desku s optimalizací mezikusem .	58
8.6	Znázornění naměřených útlumů přes izolační dvojsklo s optimalizací mezikusem .	59
8.7	Znázornění naměřených útlumů přes sádrokartonovou desku - metodika se signálovým generátorem	59
8.8	Znázornění naměřených útlumů přes dřevěnou desku - metodika se signálovým generátorem	60
9.1	Znázornění naměřených útlumů pro všechny typy překážek - optimalizace pomocí mezikusu	61

Seznam tabulek

4.1	Typické hodnoty spádového koeficientu n pro empirický model šíření [4]	29
5.1	Základní vlastnosti vybraných protokolů IEEE 802.11	34
7.1	Výpis kanálů a jejich odpovídající frekvence, na kterých se provádělo měření . . .	48
8.1	Naměřené hodnoty útlumu pro sádrokartonovou desku s optimalizací plechovým profilem	55
9.1	Průměrné hodnoty útlumu pro jednotlivé překážky a při měření s optimalizací pomocí mezikusu	63

1 Úvod

Hlavním cílem práce je navrhnout a zkonstruovat měřicí pracoviště pro šíření rádiového signálu uvnitř budov a pomocí tohoto pracoviště pak změřit tři typy různých překážek. Vše pro technologie, které využívají frekvence pásma UHF.

V první kapitole diplomové práce popisují základní problematiku a vztahy rádiového signálu, klasifikace rádiových vln, vyzařování antény, popis Fresnelovy zóny, odraz, ohyb a rozptyl vlny. V další kapitole se zaměřuji na problematiku šíření rádiového signálu ve frekvenčním pásmu UHF. Zde jsou dále popsány základní vztahy pro šíření ve volném prostoru, také jak souvisí a kdy se objevují jevy typu pomalý a rychlý únik a vícecestné šíření signálu skrze zástavbu a také popis šíření signálu přes překážky uvnitř budov.

Kapitola 4 popisuje rozdělení modelů šíření signálu podle typu prostředí nebo podle charakteru výpočtu. Jsou zde popsány tři základní modely pro šíření vln v pikobuňkách a mikrobunčkách. Tyto modely se využívají při výpočtech útlumu v budovách. Kapitola 5 pak podává základní popis o technologiích použitých pro měření. Jedná se o Wi-Fi, GSM, UMTS, LTE.

V další kapitole se již dostáváme do praktické části diplomové práce, zde popisují návrh a výrobu měřicího pracoviště. Důležitý je výpočet rozměrů pracoviště (blízké pole, Fresnelova zóna), typy materiálů a různé přístupy k výrobě pracoviště, zejména pomocí absorbérů nebo pomocí konstrukce z pozinkovaného plechu.

V další kapitole se nachází popis přípravy před měřením útlumu přes překážky. Nachází se tady popis určitých typů překážek, dále popis dvou možných metodik k měření útlumu signálu, jakým způsobem je možno optimalizovat měření pomocí vyrobeného měřicího pracoviště, nastavené parametry na spektrálním analyzátoru, případně signálovém generátoru, a popis antény použité pro vysílání i příjem rádiového signálu.

V osmé kapitole je popsáno praktické měření útlumu rádiového signálu přes překážky pomocí měřicího pracoviště. Pro znázornění se zde nachází grafy naměřených hodnot útlumů pro různé frekvence a pro různé typy překážek. Vždy je zde napsáno jakou metodikou a jaký typ optimalizace pracoviště jsem použil pro měření. Poslední kapitolou je porovnání a vyhodnocení mých výsledků s volně dostupnými daty o útlumu dané překážky na určité frekvenci.

2 Základní pojmy pro šíření vln

2.1 Elektromagnetická vlna

Elektromagnetická vlna je složena ze dvou složek – elektrická složka a magnetická složka. Tyto dvě složky jsou reprezentovány dvěma vektory, které jsou navzájem na sobě kolmé. Stejně tak jsou kolmé na směr šíření. Lze tak říci, že rovinná vlna ve volném prostoru je příčně (transverzálně) elektromagnetická TEM (*Transverse Electromagnetic*). Vektory elektrické a magnetické intenzity nemají podélné složky neboli jejich složky, které jsou rovnoběžné se směrem šíření, jsou nulové.

Důležitým parametrem pro elektromagnetické vlny je primárně pracovní frekvence, případně vlnová délka. Vztah mezi těmito veličinami udává vzorec:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (2.1)$$

kde: λ vlnová délka [m]

c rychlost elektromagnetické vlny ve vakuu (přibližně $3 \cdot 10^8$ m/s)

f frekvence [Hz]

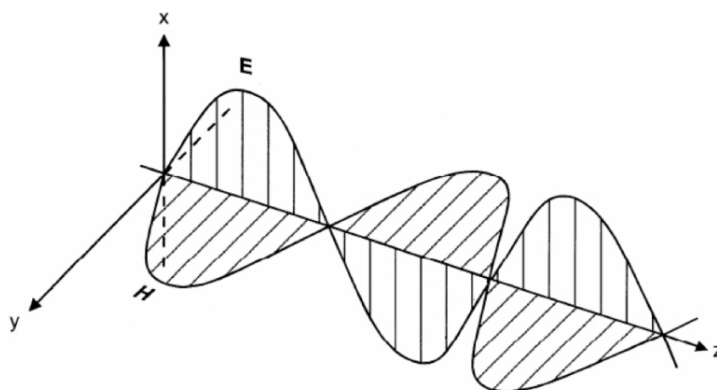
Směr šíření rovinné vlny je dán Poyntingovým vektorem, který se dá vyjádřit jako vektorový součet okamžité hodnoty intenzity elektrického pole \mathbf{E} a intenzity magnetického pole \mathbf{H} .

$$s(t) = \mathbf{E} \times \mathbf{H}, \quad (2.2)$$

kde: $s(t)$ okamžitá hodnota Poyntingova vektoru [W/m^2]

\mathbf{E} okamžitá hodnota intenzity elektrického pole [V/m]

\mathbf{H} okamžitá hodnota intenzity magnetického pole [A/m]



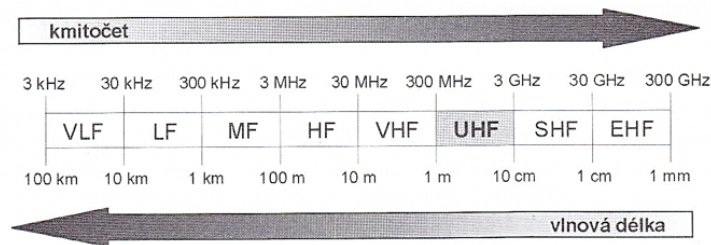
Obrázek 2.1: Znázornění šíření elektromagnetické vlny [3]

Vztah mezi intenzitou elektrického pole a intenzitou magnetického pole je dán vlnovou impedancí Z , která je pro vakuum rovna 120π nebo 377Ω . Intenzita magnetického pole je poté dána: [1, 2]

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{E}}{\sqrt{120\pi}}, \quad (2.3)$$

2.2 Klasifikace rádiových vln

Jako rádiové vlny se označuje elektromagnetické vlnění ve frekvenčním pásmu od 10 kHz až 300 GHz, které se šíří ve volném prostoru. Na obrázku 2.2 je znázorněno rozdělení frekvenčních pásem rádiových vln. Vyznačeno je pásmo ultra krátkých vln UHF (*Ultra High Frequency*), které se používají pro mobilní služby.[1]



Obrázek 2.2: Označení frekvenčních pásem dle ČSN IEC 60050-713 [1]

2.3 Decibel

Decibel je jednotka používaná jako poměr dvou hodnot stejné veličiny. Decibel je desetinou hodnoty belu. V případě měření v radiotechnice se jednotka decibel používá jako vyjádření útlumu, či zisku. Pro tuto práci je pak důležitý poměr výkonů, který můžeme zapsat jako:

$$P = 10 \log \frac{P_2}{P_1}, \quad (2.4)$$

kde: P výkonová úroveň signálu [dB]
 P_2 naměřený přijatý výkon [W]
 P_1 naměřený referenční výkon [W]

Pokud bude výkon $P_2 > P_1$ jedná se o zisk při přenosu signálu, v opačném případě se bude jednat o útlum signálu. Velmi často se v radiotechnice používá vyjádření přijatého výkonu vůči referenční hodnotě 1 mW. V tomto případě je jednotkou dBm.

2.4 Vyzařování elektromagnetické vlny

Vyzářené pole antény je charakteristické různými vlastnostmi v různých vzdálenostech od antény. Definují se tři základní zóny záření: blízká reaktanční oblast, blízká zářivá a vzdálená oblast. Tyto zóny se navzájem nepatrně překrývají.

Blízká reaktanční oblast (*Reactive Near-Field Region*) je taktéž známá jako Rayleighova oblast. Tato oblast je definována uvnitř kulové oblasti bezprostředně obklopující zářič. Poloměr koule je dán vztahem:

$$R_1 = 0,62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}, \quad (2.5)$$

kde: λ vlnová délka [m]
 D největší rozměr antény [m]

V této oblasti je vyzářený výkon celý navrácen do antény, jde o výměnu jalového výkonu. Poyntingův vektor má zde nulovou hodnotu. [2]

Blízká zářivá oblast (*Radiating Near-Field Region*) je taktéž známá jako Fresnelova oblast. Jedná se o mezioblast blízké a vzdálené zóny, kde je maximální fázová chyba $\pi/8 \approx \lambda/16$ od rovinné vlny. Vnější poloměr je dán vztahem:

$$R_2 = \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (2.6)$$

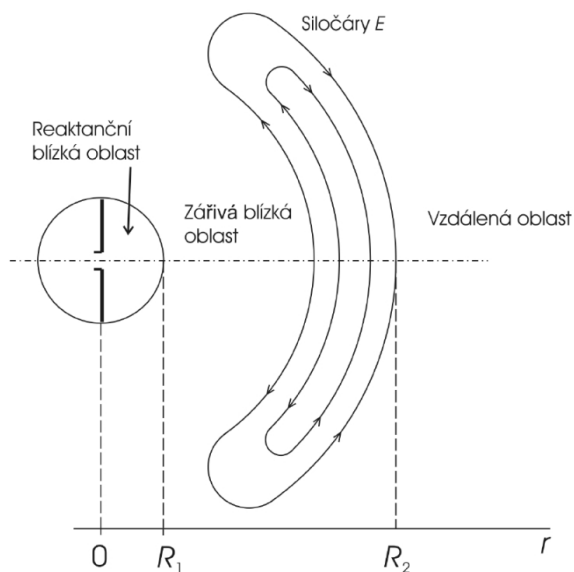
Tato rovnice platí v případě, že $D > \lambda$. V opačném případě $D < \lambda$ je nutno přičíst ke vzdálenosti hodnotu jedné vlnové délky. [2, 5, 6]

Vzdálená oblast (*Far Field*) je taktéž známá jako Fraunhoferova oblast. Tuto oblast tvoří celý prostor od hraničního poloměru R_2 . Obě složky Poyntingova vektoru jsou kolmé na směr šíření. Všechny anténní parametry jsou platné pouze ve vzdálené zóně, čili vzdálenost vysílací antény a bodu příjmu d musí být větší než poloměr Fresnelovy oblasti R_2 . Znázornění blízké a vzdálené oblast je na obrázku 2.3. [2]

Pro mou práci je nejdůležitější právě tato oblast, nýbrž v ní bude probíhat měření anténních parametrů. Poloměr vzdálené oblasti R_2 se rovná minimální vzdálenosti antény od překážky. Tento parametr je důležitý pro návrh pracoviště a umístění překážky v určité vzdálenosti od vysílací antény. Můžeme psát:

$$R_2 = D_{ref}, \quad (2.7)$$

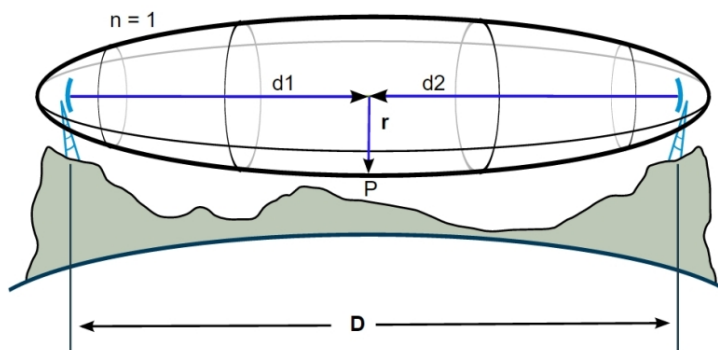
kde: D_{ref} minimální vzdálenost antény od překážky [m]



Obrázek 2.3: Znázornění blízkého a vzdáleného pole [7]

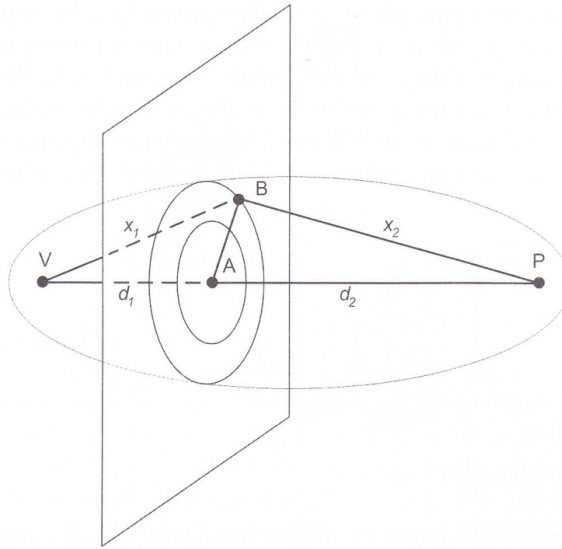
2.5 Fresnelova zóna

Fresnelova zóna určuje prostor ve tvaru elipsoidu, který je rozhodující pro přenos kvalitního signálu mezi vysílací a přijímací anténou na přímou vzdálenost. Fresnelovy zóny jsou používány pro výpočet síly signálu mezi vysílačem a přijímačem. Podle Huygensova principu můžeme každý bod vlnoplochy, do něhož dospěla vlna v určitém okamžiku, pokládat za sekundární zdroj šíření kulové vlny. Vlna se šíří z bodu zdroje V do bodu příjmu P (obrázek 2.5). Výsledek v bodě P si můžeme představit jako součet všech sekundárních zdrojů vzniklých na rovině kolmé na směr šíření.



Obrázek 2.4: Typické zobrazení Fresnelovy zóny [8]

Sekundární zdroje vyzařují elektromagnetické vlny s amplitudou a fází odpovídající šíření z primárního zdroje V. Při konstantní vzdálenosti mezi body A-B se fáze sekundárních zdrojů nemění. Pokud se poloměr kružnice mezi V-B-P začne zvětšovat, nově vytvářené sekundární zdroje začnou měnit svou fázi až do doby, kdy se ocitnou v protifázi oproti vlně primární. Vytváří se tak soustředné kružnice, které nazýváme Fresnelovy zóny. Působení dvou sousedních Fresnelových zón se kvůli opačné fázi navzájem vyruší. Tyto kompenzace se projevují tím více, čím vyšší je řadové číslo zóny. Je pravidlem, že 60% veškeré přenesené energie mezi vysílačem a přijímačem musí být vytvořeno v první Fresnelově zóně. [1]



Obrázek 2.5: Geometrická představa Fresnelových zón [1]

Významný vliv mají na přenos v první Fresnelově zóně překážky. V této zóně by měla být většina prostoru volná, v opačném případě značně narůstá útlum signálu. Nejmenší přípustná vzdálenost od překážky je dána vztahem: [1]

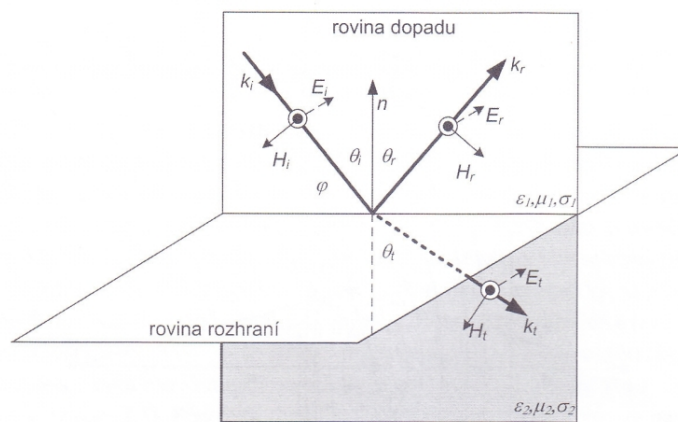
$$r_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (2.8)$$

- kde: r_n poloměr n-té Fresnelovy zóny [m]
 λ vlnová délka [m]
 d_1 vzdálenost překážky od vysílače [m]
 d_2 vzdálenost překážky od přijímače [m]
 n řád Fresnelovy zóny [-]

2.6 Odraz a lom vlny

Na rozhraní dvou prostředí s rozličnými materiálovými parametry dochází k odrazu (*reflection*) a lomu (*refraction*) elektromagnetické vlny. Na základě podmínky rovnosti tečných složek vektorů na rozhraní dvou prostředí lze odvodit Snellův zákon lomu a odrazu.

Rovinná harmonická vlna dopadá na rozhraní dvou prostředí popsaných materiálovými parametry $\varepsilon_1, \mu_1, \delta_1$ a $\varepsilon_2, \mu_2, \delta_2$. Rovinou dopadu nazýváme rozhraní, ve kterém leží Poyntingův vektor dopadající vlny a normála roviny rozhraní. Dopadající vlna se částečně odrazí a částečně pronikne do druhého prostředí. Úhel dopadu θ_i , úhel odrazu θ_r a úhel θ_t , pod kterým se vlna láme do druhého prostředí, se měří od kolmice k rovině rozhraní. k_i, k_r, k_t jsou vlnové vektory ve směru Poyntingova vektoru dopadající, odražené a pronikající vlny do druhého prostředí. [1]



Obrázek 2.6: Znázornění odrazu rovinné vlny od rovinného prostředí [1]

Podle Snellova zákona platí:

$$\theta_i = \theta_r \quad (2.9)$$

$$k_1 \sin \theta_i = k_2 \sin \theta_t, \quad (2.10)$$

kde: k_1, k_2 konstanty šíření pro obě prostředí [m]

Pro prostředí $\mu_1 = \mu_2$ lze vyjádřit:

$$\frac{\sin \theta_t}{\sin \theta_i} = \frac{k_1}{k_2} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r1}}}{\sqrt{\varepsilon_{r2}}} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{Z_2}{Z_1}, \quad (2.11)$$

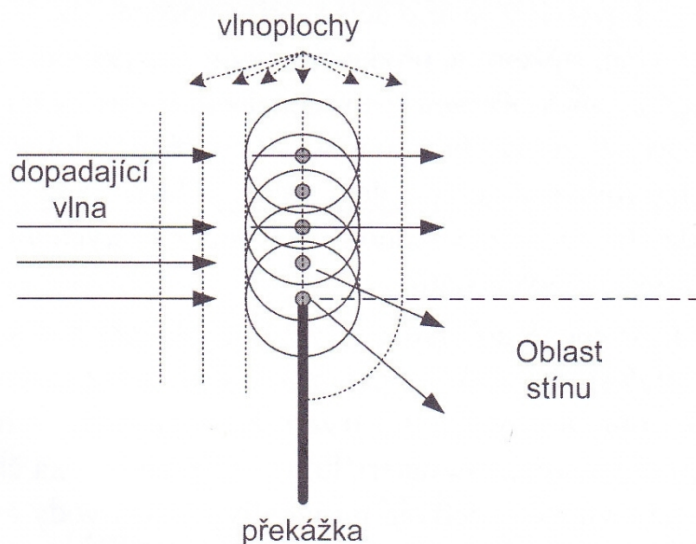
kde: n index lomu [-]

v fázová rychlost šíření [m/s]

d_1 vzdálenost překážky od vysílače [Ω]

2.7 Ohyb

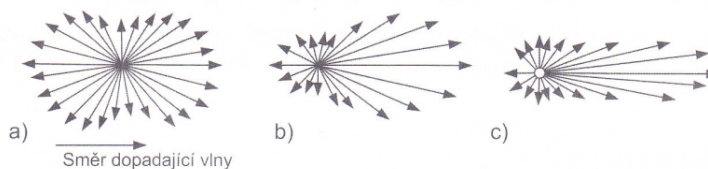
Ohyb, nebo jiný názvem difrakce (*diffraction*), nastává v případě, když se elektromagnetická rovinná vlna dostává k překážce, za kterou by v normální situaci nastal signálový stín, tzv. oblast stínu. Tento jev se dá popsat pomocí Huygensova principu (kapitola 2.5). Situace, ve které nastává difrakce, je typická v kopcovitém terénu, kde jsou překážky větší, než je vlnová délka šířeného signálu. [1]



Obrázek 2.7: Princip šíření vln do oblasti stínu za překážkou [1]

2.8 Rozptyl

Rozptyl (scattering) nastává na nehomogenitách, které mají jiné materiálové vlastnosti než okolní prostředí a jsou menší ve srovnání s vlnovou délkou signálu. Typickým příkladem jsou dešťové kapky. Dopadá-li na tuto částici elektromagnetická vlna, vybudí na nehomogenitě elektrické pole a následné sekundární záření způsobí rozptyl vlny. [1]



Obrázek 2.8: Rozptyl vlny na kulové částici: a) Rayleighův rozptyl na velmi malé částici; b) Mieův rozptyl na menší částici; c) Mieův rozptyl na velké částici [1]

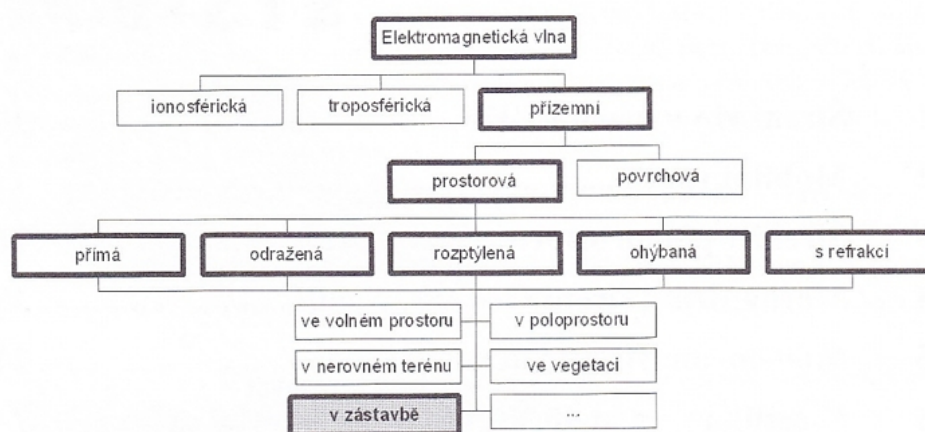
Pro šíření elektromagnetické vlny rozlišujeme dva základní typy rozptylů [1]:

- Rayleighův rozptyl – předpokládá rozptyl na molekulách plynu, které jsou mnohem menší než vlnová délka dopadající vlny (obecně $1/10\lambda$). Vlna se díky Rayleighově teorii rozptyluje do všech stran.
- Mieův rozptyl – obecnější případ rozptylu. Počítá s libovolně velkou kulovou částicí. Pokud se vlnová délka nehomogenity blíží vlnové délce signálu, začíná převládat dopředný rozptyl ve směru šíření elektromagnetické vlny.

3 Šíření rádiových vln v zástavbě

3.1 Šíření vln v pásmu UHF

Pro potřeby plánování rádiových systémů je důležitá teorie šíření vln v zemské atmosféře. Na obr. 1 je znázorněno jedno z možných rozdělení šíření vln pro pozemní rádiové systémy. Ionosférická a troposférická vlna se šíří pomocí odrazů v atmosféře. Tyto vlny pro tuto práci nejsou podstatné. Přízemní povrchová vlna se šíří podél rozhraní země-vzduch. Pro potřeby práce, šíření vln v zástavbě a v budovách, je třeba pracovat s přízemní prostorovou vlnou.



Obrázek 3.1: Prostorová klasifikace elektromagnetických vln pro pozemní rádiové spoje [4]

Délka vlny λ a rozměry objektů v daném prostředí určují, jakým způsobem se bude vlna tlumit, odrážet, ohýbat a rozptylovat. Mobilní služby v této době používají kmitočtové pásmo ultra krátkých vln UHF (*Ultra High Frequency*). Hlavním důvodem jsou velmi vhodné vlastnosti elektromagnetických vln pro komunikaci na příslušných frekvencích: relativně malé ztráty šířením, dobrá schopnost odrážet, ohýbat a pronikat překážkami v zástavbě. Menší vlnové délky frekvencí UHF také umožňují konstrukci rozměrově malých antén pro mobilní zařízení. Vedle mobilních služeb je UHF pásmo použito i pro televizní vysílání nebo pro družicovou komunikaci (navigační služby typu GPS). Tyto frekvence se však nehodí na přenos dat na větší vzdálenost z důvodu útlumu energie vlny vlivem atmosférické absorpce.

Přízemní prostorová vlna se může šířit buď jako přímá vlna při rádiové dohlednosti mezi oběma spoji nebo jako vlna s interakcí (ohyby, odrazy, atd.) s terénem nebo jinou překážkou. Podle prostředí, se kterým se vlna navzájem ovlivňuje, lze mluvit o vlně šířící se ve volném prostoru, v poloprostoru nad rovinou země, nad členitým terénem, nad terénem s vegetací a vlně šířící se v zástavbě. Při šíření přímou vlnou je útlum minimální a závisí hlavně na frekvenci a vzdálenosti mezi oběma spoji. Vlna vzniklá interakcí už vykazuje vyšší útlum, hlavně z důvodu vícecestného šíření signálu. Také závisí na velikosti a materiálovém složení překážky, od které se vlna odráží, rozptyluje či odráží.

Pro popis úrovně signálu generovaného vysílací anténou v daném bodě pozorování se používají dva typy zápisu. V prvním případě můžeme úroveň signálu popsat jako intenzitu elektrického pole v bodě pozorování nebo ve druhém případě jako výkonovou úroveň v místě přijatou přijímací anténou. [4]

3.2 Šíření ve volném prostoru

Pro šíření vln v idealizovaných podmínkách ve volném prostoru platí následující vztah:

$$E_{ef} = \frac{\sqrt{30P_V G_V}}{d}, \quad (3.1)$$

kde: E_{ef} efektivní hodnota intenzity elektrického pole v místě pozorování [V/m]
 P_V výkon na vstupu vysílací antény [W]
 G_V zisk vysílací antény v daném směru [-]
 d vzdálenost mezi vysílací anténou a bodem příjmu [m]

Je-li v bodě příjmu umístěna přijímací anténa, lze při stavu impedančního přizpůsobení psát:

$$P_P = \frac{E_{ef}^2}{120\pi} \frac{G_P \lambda^2}{4\pi} = P_V G_V G_P \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2, \quad (3.2)$$

kde: P_P výkon přijatý přijímací anténou v místě pozorování [W]
 λ vlnová délka [m]
 G_P zisk přijímací antény v příslušném směru [-]

Úpravou poté získáme rovnici ideálního přenosu známou pod názvem Friisův vztah:

$$\frac{P_P}{P_V} = G_V G_P \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (3.3)$$

V praxi se pak používá výhradně vyjádření v decibelech:

$$P_P = P_V + G_V + G_P - L_{FSL} - L, \quad (3.4)$$

kde: P_P přijatá výkonová úroveň [dBm]
 P_V výkonová úroveň na vstupu vysílací antény [dBm]
 G_V zisk vysílací antény [dB]
 G_P zisk přijímací antény [dB]
 L_{FSL} ztráty volným prostorem [dB]
 L ostatní ztráty [dB], např. impedanční nepřizpůsobení, ztráty šířením mezi anténami, útlum anténních kabelů apod.

Ztráty volným prostorem (FSL – Free Space Loss) se v decibelech vyjádří následovně:

$$L_{FSL} = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (3.5)$$

Tento vzorec lze vyjádřit i v praktických jednotkách vztahem:

$$L_{FSL} = 32,4 + 20 \log (f_{MHz}) + 20 \log (d_{km}), \quad (3.6)$$

kde: f_{MHz} frekvence [MHz]
 d_{km} vzdálenost [km]

FSL jsou funkcí vzdálenosti, výkon klesá s druhou mocninou vzdálenosti (20 dB na dekádu nebo 6 dB na oktávu). [1, 4]

3.3 Úniky

Ztráty šířením se mohou projevovat následujícími způsoby, např. ztrátami volným prostorem, difrakčními ztrátami vlivem zastínění překážkou, útlumem atmosférickými plyny, ztrátami vícecestným šířením, ztrátami vlivem změny úhlu odchodu a dopadu vlny, útlumem hydrometeory (dešťové přeháňky, kroupy, apod.), ztrátami v ionosféře aj. Ztráty volným prostorem působí na signál neustále. Jevy, které působí zcela náhodně (např. útlum hydrometeory), se nazývají úniky (*fading*). Následují typy úniků platí pro pevné rádiové spoje a to při nezastíněném šíření v atmosféře.

Ploché úniky (*flat fading*) způsobují konstantní útlum signálu na celém frekvenčním pásmu přenosu. Jejich změny jsou pomalé a nemají na ně vliv změny polohy antén. Typickým jevem způsobující plochý únik je atmosférická refrakce.

Frekvenčně selektivní úniky (*frequency selective fading*) se charakterizují proměnlivým útlumem vzhledem k frekvenčnímu pásmu přenosového kanálu. Příčinou je vícecestné šíření signálu, kdy se v místě signálu sčítají minimálně dvě vlny, primární a druhotná. Pokud mají obě vlny srovnatelnou amplitudu ale opačnou fázi, dochází k jejich odečtení, tzv. hluboký únik. Za takové situace stačí malá změna vlnové délky nebo dráhového rozdílu a útlum se výrazně změní. Hloubka úniku se tak může v čase velmi rychle měnit.

Pro mobilní spoje v zástavbě se mluví o pomalých a rychlých únicích. Pomalé úniky (*slow fading*) vznikají zastíněním spoje zástavbou a z hlediska frekvenčního pásma mají charakter plochých úniků. Pomalé úniky jsou způsobeny tlumením šíření signálu ve volném prostoru a tlumením stínění. Předpokládá se pohyb mobilní antény v zástavbě, nastávají pomalé změny zastínění spoje a tím i hloubky útlumu.

Rychlé úniky (*fast fading*) mají frekvenčně selektivní charakter a jeho příčinou je vícecestné šíření signálu a dopplerovský posuv, který vzniká důsledkem pohybu mobilní antény vůči zdroji vysílání. Většinou se jedná o sčítání velkého množství paprsků přicházejících po různých drahách ze všech směrů. Tyto úniky se dají z průběhu přijímaného signálu „odfiltrovat“ průměrováním

skrze vhodný časový interval, resp. dráhu pohybu přijímací antény v případě mobilního spoje. [1, 4]

3.4 Vícecestné šíření

K vícecestnému šíření (*multipath propagation*) signálu dochází při pozemních rádiových spojkách díky interakci elektromagnetické vlny s atmosférou a zemským povrchem. Díky tomuto jevu se od antény vysílací a antény přijímací šíří kromě přímé vlny i vlna odražená, která se s přímou vlnou sčítá. Při šíření v zástavbě může být odražených vln nekonečně mnoho. V místě příjmu dochází k vektorovému sčítání intenzit pole jednotlivých paprsků \mathbf{E}_i :

$$\mathbf{E}_i = \sum i\mathbf{E}_i \quad (3.7)$$

kde: \mathbf{E} výsledný vektor intenzity elektrického pole [V/m]

Na cestě každého rádiového signálu může dojít k odrazům, difracím či průchodům skrz překážky. Díky těmto jevům lze navázat spojení mezi vysílačem a přijímačem i v případě, kdy mezi nimi neexistuje optická viditelnost.

Jednotlivé paprsky mají různou dráhu šíření a na přijímací anténu poté dopadají s různou fází, tudíž se zpožděním. Základní popis časového zpoždění umožňuje impulzová odezva (*impulse response*), což je přijatá úroveň signálu při vyslání Diracova impulsu (nekonečně časově úzký a amplitudově vysoký impuls) vysílací anténou v čase $t=0$. Vícecestné šíření lze popsat dále pomocí úhlu dopadu (AOA – *Angle Of Arrival*), který popisuje směry šíření signálu do daného místa, a úhlu odchodu (AOD – *Angle Of Departure*), tedy parametr, který popisuje směr šíření energie od zdroje záření. K parametrickému popisu impulzové odezvy slouží rozptyl dob zpoždění (*rms delay spread*). Rozložení příjmu impulsu do delšího časového úseku může degradovat rádiové spojení a omezit tak použitelnou šířku pásma. [1, 4]

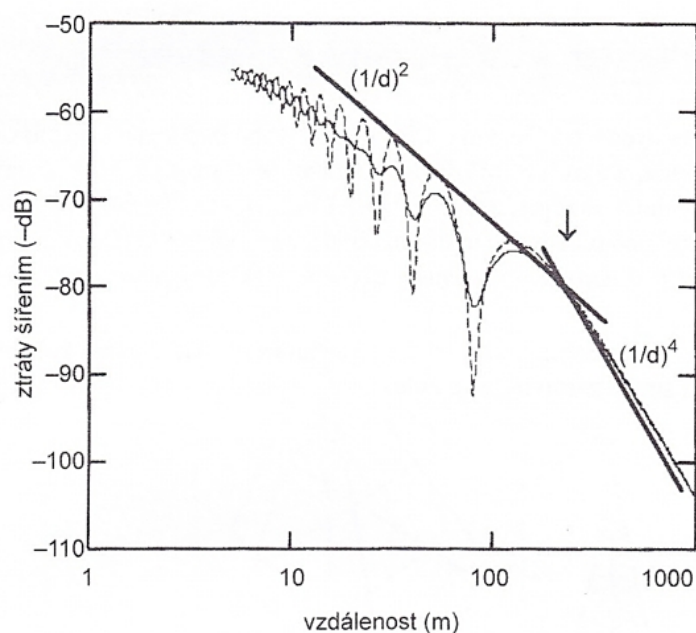
3.4.1 Fresnelův zlom

Je to místo, kde je dráhový rozdíl přímého a odraženého paprsku roven polovině vlnové délky. Před Fresnelovým zlomem je závislost nepřímo úměrná druhé mocnině vzdálenosti (pokles o 20 dB na dekádu), za Fresnelovým zlomem je nepřímo úměrná čtvrté mocnině vzdálenosti (pokles o 40 dB na dekádu).

Při malých výškách antén se vzdálenost Fresnelova zlomu d_0 vyjádří jako:

$$d_0 = \frac{4h_1h_2}{\lambda} \quad (3.8)$$

kde: d_0 vzdálenost Fresnelova zlomu [m]
 h_1, h_2 výšky antén spoje [m]
 λ vlnová délka [m]



Obrázek 3.2: Průběh spádové křivky s vyznačením Fresnelova zlomu (tenké čáry – přesný výpočet pro obě polarizace, silné čáry - aproximace) [4]

Určení polohy Fresnelova zlomu je důležité. U velkých makrobuněk, resp. velmi malých pikobuněk nás zajímá pouze oblast před Fresnelovým zlomem nebo pouze oblast za zlomem. U mikrobuněk je třeba počítat se zahrnutím zlomu do výpočtů. [4]

3.5 Šíření signálu uvnitř budov

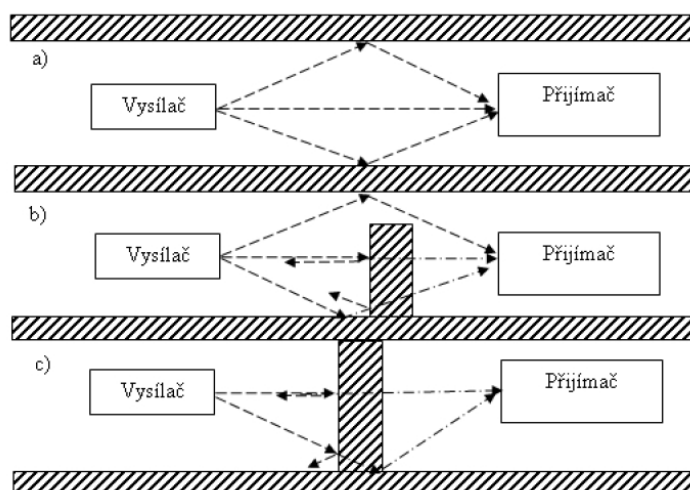
Základními parametry ovlivňující rušení signálu při průchodu budovami a skrze překážky jsou prostorové uspořádání mezi přijímací a vysílací anténou a také rušení signálu od jiných systémů, které pracují na stejných frekvencích.

Toto rušení nastává zejména při používání technologií tzv. nelicencovaného pásma ISM (*Industrial, Scientific and Medical*). Účinky interferencí způsobených fungováním na stejných frekvencích řeší skupiny starající se o vývoj těchto standardů. Mohou být použitý modulace, umožňující efektivní využívání šířky pásma, např. metodu rozprostřeného spektra s přeskakováním frekvencí FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*).

Druhým výše zmíněným problémem je prostorové uspořádání mezi anténami, zejména se jedná o výskyt různých překážek v prostoru. Existují 3 základní varianty rozložení překážek v prostoru [9]:

- a) Tato varianta znamená, že mezi vysílačem a přijímačem dochází k přímé viditelnosti. K útlumu rádiových vln dochází při průchodu prostorem a odrazy od stěn, podlahy a stropu.

- b) V tomto případě je mezi anténami umístěna překážka, která ovlivní přenos signálu. Nedo-
cháží k přímé viditelnosti, vlny se šíří jak odrazy od stěn, tak i skrze překážku.
- c) V posledním případě zastiňuje překážka celou plochu od vysílače k přijímači. Signál tak
prochází pouze přes tuto překážku. Je nutné počítat s mnoha různými typy překážek,
vyrobených z různých typů materiálu. Zde je útlum signálu nejvýraznější. Pokud bude na
vstupu přijímače úroveň signálu nízká, sníží se přenosová rychlost. V případě velmi velkého
útlumu nemusí překážkou projít žádný signál a spoj přestane komunikovat.



Obrázek 3.3: Znázornění vlivu překážek na přenos signálu [9]

Ovlivnit útlum mohou i vzdálenosti mezi anténami, především u variant a) a b). Je tedy potřeba dbát i na tuto skutečnost. Vedle tohoto faktu, nejvíce ovlivňujícím faktorem jsou typ materiálu, druh materiálu a frekvence vlny, resp. její vlnová délka. Konstrukce podlaží a stropů jsou oproti stěnám a příčkám mohutnější, útlum signálu je tak mnohem větší při průchodu podlažími.

Je pravidlem, že útlum na běžných stavebních materiálech roste společně s rostoucí frekvencí. Vlna od materiálu odražená závisí také na úhlu dopadu rádiové vlny, zvlnění povrchu materiálu a velikostí odrazové plochy. Pokud je povrch hladký dojde k zrcadlovému odrazu. V opačném případě se dopadající vlna rozdělí do několika utlumených vln a odrazí se do mnoha směrů.

Uvnitř budov se často uplatňuje tzv. tunelový jev. Ten nastává v případě, když vlna prochází dlouhými chodbami nebo výtahovými šachtami. Chodby pak fungují jako vlnovod. V případě uplatnění tohoto jevu útlum se vzdáleností roste paradoxně méně než ve volném prostoru. Tento jev nastává při vyšších kmitočtech. Složitější situace, jež mohou v zástavbě nastat, jsou pak popsány pomocí modelů šíření vln. [9, 10]

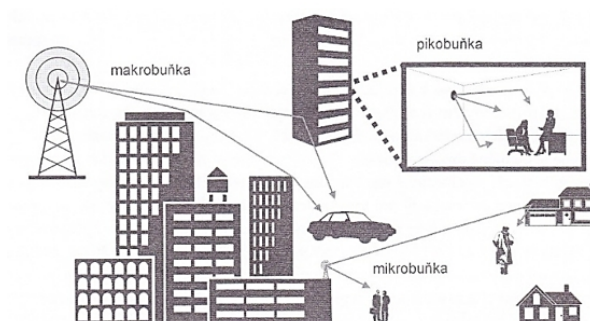
4 Modely šíření vln

4.1 Klasifikace modelů šíření vln v zástavbě

Klasifikace podle typu prostředí

Přístup k modelování šíření signálu mobilního spoje je určen především okolním prostředím a umístěním pevné vysílací antény. Tyto parametry jsou dány typem buňky, ve kterém se signál šíří [4]:

- makrobuňka (*macrocell*) – pevná anténa je umístěna nad úrovní střech. Dominantním efektem pro šíření vln v makrobuňkách je difrakce na hranách střech a odrazy od objektů v blízkosti antény. Poloměr buňky se pohybuje zhruba od 1 km do 30 km.
- mikrobuňka (*microcell*) – pevná anténa je umístěna pod úrovní střech. Pro šíření signálu je rozhodující přímá viditelnost mezi vysílací a přijímací anténou a odrazy od stěn budov. Poloměr buňky od 100 m do 1 km.
- pikobuňka (*picocell*) – pevná anténa je umístěna v uzavřeném interiéru. Z hlediska šíření vlny je nejkomplikovanější. Energie se šíří přímo, průchodem stěnami, odrazy či ohyby. Signál ovlivňuje interiér, schodiště, výtahové šachty i okolní budovy. Vlna však běžnými překážkami proniká dobře a při výpočtech lze použít i nejjednodušší empirické modely. Rozměry pikobuňky se pohybují řádově v desítkách metrů.



Obrázek 4.1: Šíření elektromagnetické vlny v zástavbě [4]

Klasifikace podle charakteru výpočtu

Kromě klasifikace dle prostředí lze modely dělit i podle charakteru výpočtu [4]:

- empirický charakter – jde většinou o jednoduché vztahy pro daný typ prostředí, kde jsou parametry založeny na velkém objemu naměřených dat. Tyto modely mají malou přesnost.
- deterministický charakter – teoretické modelování na fyzikálním základě šíření vlny pro idealizovaný nebo zjednodušený popis daného prostředí. Tyto modely jsou složitější, ale jejich výstup je přesnější než u empiricky založených modelů.

- semi-deterministický, resp. semi-empirický charakter – kombinace dvou předešlých postupů.
- stochastický charakter – data pro simulaci přenosového kanálu jsou náhodně generována na základě vstupních parametrů. Není zde potřeba znát geometrii přenosového prostředí nebo umístění pevné a mobilní antény.

Empirické modely jsou v praxi nejpoužívanější, zejména kvůli své nenáročnosti na výpočetní prostředky a čas. Dávají dobré výsledky pro predikci útlumu v makrobuňkách a v jisté míře i v pikobuňkách. Nejsou schopny vypočítat širokopásmové parametry typu impulzové odezvy a úhlu dopadu. Mezi tyto modely patří One-Slope Model nebo model ITU-R P.1238. Deterministické modely pak modelují útlum šířením, tak i širokopásmové parametry. Přesné výsledky ale závisejí na kvalitě vstupních dat, jejichž získání může být velmi finančně náročné. Mezi tyto modely šíření patří optické modely. [4]

4.2 Základní empirický model

Základní empirický model „ $1/dn$ “ je možné použít tam, kde předpokládáme spádovou křivku úměrnou n -té mocnině vzdálenosti, tedy kde útlum narůstá s příslušnou mocninou vzdálenosti. Jedná se o základ pro všechny empirické modely. Výhodou je jednoduchá implementace a rychlý výpočet. Tento model však lze použít pouze v homogenním prostředí a jeho přesnost je závislá na empirických parametrech získaných z daného prostředí a za daných podmínek.

Základní vzorec základního empirického modelu předpokládá hladký nárůst ztrát s mocninou vzdálenosti:

$$L(d) = L_1(d_1) + 10n \log \left(\frac{d}{d_1} \right) \quad (4.1)$$

kde: L ztráty šířením [dB]
 d vzdálenost od vysílací antény [m]
 d_1 referenční vzdálenost [m]
 L_1 referenční útlum [dB] pro referenční vzdálenost d_1
 n spádový koeficient [-]

Tabulka 4.1: Typické hodnoty spádového koeficientu n pro empirický model šíření [4]

Prostředí	Spádový koeficient n
Volný prostor	2,0
Městská zástavba	2,5-4,0
Hustá městská zástavba	3,0-5,0
Uvnitř budov – přímá optická vzdálenost	1,6-1,8
Uvnitř budov – zastínění	3,0-6,0

Model je určen dvěma parametry L_1 a n , které jsou získány z velkého počtu měření v daném prostředí. Spádový koeficient n udává rychlost nárůstu ztrát se vzdáleností. Typické hodnoty tohoto parametru jsou uvedeny v tabulce 4.1. [4]

4.3 One-Slope model

Implementace základního empirického modelu v pikobuňkách. Kvůli své jednoduchosti a malým nárokům na vstupní data se používá pro rychlé výpočty v interiéru. Tento výpočetní model je však méně přesný a výsledky se musí brát orientačně. Při vhodně zvolených parametrech se směrodatná odchylka blíží typicky k 10 dB. Výpočet ztrát šířením je funkcí vzdálenosti, při použití všesměrové základnové antény je výsledná predikce rozložena do soustředných kružnic a to nehledě na členění interiéru. [4]

Výpočet je podobný jako u základního empirického modelu s tím, že vzdálenost d musí být menší než vzdálenost Fresnelova zlomu. Samotný výpočet se pak rovná:

$$L(d) = L_1 + 10n \log(d) \quad (4.2)$$

kde: $L(d)$	predikovaná hodnota ztrát šířením [dB]
d	vzdálenost mezi základnovou stanicí a bodem pozorování ($d > 1$ m) [m]
L_1	referenční hodnota ztrát pro vzdálenost 1 m [dB]
n	spádový koeficient [-]

Hodnoty parametrů L_1 a n se podobně jako u základního empirického modelu získávají z dostatečně velkého počtu měření v daném prostředí. Obecné zásady pro určení spádového koeficientu n jsou následující [4]:

- Při přímé viditelnosti obou antén a ve velkých rozlehlých prostorech se útlum šíření blíží ztrátám volným prostorem, tj. $n = 2$.
- Při přímé viditelnosti na chodbách je n menší než 2.
- Při zastínění spoje v členitém interiéru se n pohybuje okolo 4.
- Při šíření na přímou viditelnost a velkou vzdálenost se může projevit efekt Fresnelova zlomu. Za tímto zlomem se zvýší koeficient n ze 2 na cca 4.

Model šíření ITU-R P.1238 vychází právě z One-Slope modelu. Tento model však ve svých výpočtech zahrnuje i šíření elektromagnetické vlny skrze podlažími. Díky tomuto jsou pak výsledky tohoto modelu o něco přesnější než One-Slope model.

4.4 Multi-Wall model

Multi-Wall model patří mezi semi-empirické modely, které významně zpřesňují výpočty v pikobuňkách. Semi-empirické modely berou do úvahy členění interiéru. Tento model poskytuje

přijatelné výsledky za rozumných požadavků na vstupy i náročnosti výpočtu. Model vyžaduje přesné informace o rozmístění a typu příček v jednotlivých patrech.

Výpočet je složitější než u základního empirického modelu. Bod umístění základnové antény a bod přijímací antény, kde se určuje úroveň pokrytí, jsou spojeny pomyslnou úsečkou. Model pak bere do úvahy veškeré stěny a podlaží, které tato úsečka protíná.

Celkové ztráty šíření jsou dány vztahem:

$$L(d) = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) + \sum_i k_{wi} L_{wi} + k_f \left(\frac{k_f + 2}{k_f + 1} - b \right) L_f \quad (4.3)$$

kde: $L(d)$	celkový predikovaný útlum [dB]
d	vzdálenost [m]
λ	vlnová délka [m]
k_{wi}	počet příček typu i , které protíná spojnice vysílač-přijímač [-]
L_{wi}	činitel útlumu pro příčky typu i [dB]
k_f	počet podlaží, které protíná spojnice vysílač-přijímač [-]
L_f	činitel útlumu pro průchod podlažím [dB]
b	konstanta nelinearity útlumu průchodem skrz více podlaží [-]

První člen vzorce jsou ztráty volným prostorem pro vzdálenost d , v prostředí bez příček se jedná o One-Slope model s $n = 2,0$. Pomocí parametru b model respektuje nelineární nárůst ztrát šířením s počtem prošlých podlaží. Při šíření signálu mezi více podlažími se totiž přestává uplatňovat mechanismus šíření vlny skrz jednotlivá podlaží, ale více se zde vyskytuje difrakční šíření skrze okna odrazem od okolní zástavby nebo šíření uvnitř výtahových šachet. Implicitní hodnota je $b = 0,46$. Při šíření skrz méně než tři podlaží lze ze vzorce lze exponent vynechat a uvažovat lineární závislost $k_f L_f$. Při větším počtu podlaží pak převažuje difrakční šíření vln.

Model nepočítá s rozmístěním vybavení interiérů, otevíráním a zavíráním dveří či oken a dalšími objekty, které mohou ovlivnit šíření signálu. Pro většinu typů budov se většinou používají dva typy příček: slabá a silná příčka. Při implementaci modelu v konkrétní lokalitě můžeme uvažovat i další typy příček typu skleněné přepážky s příslušnou korekcí činitele útlumu. Hodnoty činitelů útlumu pro jedno frekvenční pásmo se mohou lišit podle toho, kde bylo prováděno měření.

Při vhodné volbě empirických konstant se směrodatná odchylka pohybuje okolo 5 dB. Pokrytí predikované Multi-Wall modelem je stejné jako u One-Slope modelu, s tím rozdílem, že zahrnuje i typy příček, takže se v těchto místech mění útlum signálu skokově. [4]

5 Telekomunikační systémy využívající pásmo UHF

Telekomunikačních systémů a sítí, pracujících v decimetrovém pásmu UHF se počítá na několik desítek, včetně systémů určených pro digitální televizní vysílání, mobilní zařízení, GPS, vysílačky a další aplikace. V této práci se budou proměřovat technologie GSM, UMTS, LTE a Wi-Fi.

5.1 GSM

GSM, neboli Globální systém pro Mobilní Komunikaci, je stále nejrozšířenějším standardem pro mobilní komunikaci na světě. Patří do sítí druhé generace 2G. O jeho provoz se stará evropský institut pro telekomunikační normy ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*). GSM pracuje na frekvencích 900 MHz a frekvenci 1800 MHz. Na některých místech (např. severoamerický region) se využívají frekvence okolo 850 nebo 1900 MHz.

Patří mezi buňkové sítě. Je to plně digitální síť využívající fázovou modulaci s Gaussovským posunem GMSK (*Gaussian Minimum-Shift Keying*) a kombinovanou metodu mnohonásobného přístupu TDMA (*Time Division Multiple Access*)/FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), jejíž frekvenční kanály pro downlink a uplink jsou odděleny pomocí frekvenčního duplexu FDD (*Frequency Division Duplex*). [11, 12, 13]

5.1.1 Architektura sítě GSM

Architektura sítě GSM se skládá ze tří hlavních částí:

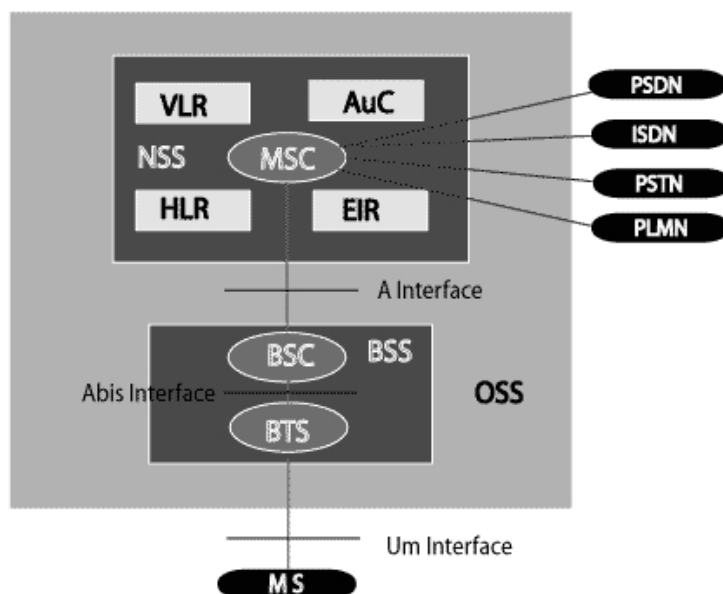
- Subsystem základnových stanic BSS (*Base Station Subsystem*)
- Síťový a přepínací subsystem NSS (*Network and Switching Subsystem*)
- Operační podpůrný subsystem OSS (*Operation Support Subsystem*)

BSS poskytuje a spravuje přenos mezi mobilní stanicí a NSS. Obsahuje systémy jako základnová stanice BTS (*Base Transceiver Service*) zajišťující rádiové spojení s mobilní stanicí, základnová řídicí jednotka BSC (*Base Station Controller*) zajišťující například handover a transkódovací jednotka TRAU [11, 14]

NSS realizuje přepínací a spojovací funkce jako klasická radiokomunikační ústředna. Jedná se o hlavní část celé architektury. Tento blok obsahuje radiotelefonní ústřednu MSC (*Mobile Switching Centre*), domovský lokační registr HLR (*Home Location Register*), návštěvnický lokační registr VLR (*Visitor Location Register*), centrum autenticity AuC (*Authenticity Centre*), Registr mobilních stanic EIR (*Equipment Identity Register*) a centrum krátkých textových zpráv SMSC (*Short Message Service Centre*) [11, 14]

OSS zajišťuje servis, kontrolu a správnou činnost celého GSM systému. Do tohoto systému patří například provozní a servisní centrum OMC (*Operation and Maintenance Centre*) a centrum managementu NMC (*Network Management Centre*) [11, 14]

Mezi jednotlivými bloky subsystémů jsou dále definovány následující rozhraní Um mezi mobilní stanicí a BTS, Abis mezi BTS a BSC a rozhraní A mezi BSC a MSC. [11, 14]



Obrázek 5.1: Architektura GSM [14]

5.2 UMTS

UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) je mobilní síť třetí generace 3G. Systém vychází ze standartu GSM. Oproti GSM podporuje koexistenci několika spuštěných aplikací najednou. Došlo také k navýšení přenosové rychlosti v reálném provozu až na několik Mbit/s.

Na rádiovém rozhraní byla zvolena širokopásmová přístupová metoda WCDMA (*Wide Code Division Multiple Access*). K rozeznání uživatelů je tak použit individuální kód. Šířka pásma jednoho kanálu je 5 MHz. UMTS využívá frekvenční pásma 1920-1980 MHz a 2110-2170 MHz pro párová pásma uplink a downlink a frekvenční pásma 1900-1920 MHz a 2010-2025 MHz pro nepárová pásma uplink a downlink. U párových pásem se duplex vytváří pomocí FDD metody, u nepárových pomocí TDD metody. V roce 2000 byla přidána k výše uvedeným frekvenčním rozsahům další tři pásma a to 806-960MHz, 1710-1885 MHz, a 2500-2690 MHz.

Architektura sítě UMTS se podobá sítím GSM. Páteřní síť CN (*Core Network*) se nachází na rozhraní s externími sítěmi a má podobnou funkci jako NSS spojovací a přepínací subsystém v GSM. S CN je spojena rádiová přístupová síť UTRAN (*UMTS Terrestrial Radio Access Network*) a má podobnou funkci jako BSS subsystém základnových stanic. Uživatelé se k síti připojují pomocí terminálů UE (*User Equipment*).

Přístupová síť UTRAN obsahuje dvě síťové jednotky NodeB, což je ekvivalent k základnové stanici BTS, a RNC (*Radio Network Controller*), který slouží jako řídicí jednotka sítě. UE

zařízení používá pro identifikace uživatele kartu USIM (*Universal Subscriber Identity Module*) namísto SIM karty použité v GSM. [11, 15]

5.3 LTE

LTE (*Long Term Evolution*) navazuje na sítě 3G a přináší nová vylepšení. Můžeme mluvit o technologii čtvrté generace 4G. Veškerá komunikace se přenáší jako datový přenos pomocí techniky přepínání paketů a to včetně hlasových služeb. Pro uživatele nejpříjemnější změnou je navýšení přenosové rychlosti až na stovky Mbit/s. Pro downlink používá LTE širokopásmový vícenásobný přístup pomocí ortogonálních frekvencí OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiplex Access*) a pro uplink používá přístup pomocí frekvenčního dělení jedné nosné SC-FDMA (*Single Carrier – Frequency Division Multiplex Access*). Šířka pásma je 20 MHz. Jako duplexní technika je použita jak TDD, tak FDD. Evropa používá FDD duplex.

LTE může fungovat až na 44 frekvenčních subpásmech, z nichž některé fungují celosvětově, jiné zase lokálně. V České republice jsou použity pásma 800, 1800, 2100 a 2600 MHz.

Základním prvkem architektury LTE sítě je eNodeB. Obstarává komunikaci s koncovým zařízením UE, přiděluje rádiové prostředky na fyzické vrstvě, obstarává šifrování atd. [11, 16]

5.4 Wi-Fi

Jedná se o soubor několika standardů IEEE 802.11 (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) popisující bezdrátový přenos dat v počítačových sítích. Patří mezi bezdrátové místní sítě WLAN (*Wireless Local Area Network*) a využívá bezlicenční frekvenční pásma 2,4 a 5 GHz. Maximální dosah se pohybuje okolo 100 m od přístupového bodu při nejsilnějším povoleném výkonu. Dosah samozřejmě velmi ovlivňují překážky v cestě signálu. Počet rádiových kanálů, jejich odstupy a šířka pásma kanálu je závislá na použitém protokolu.

Tabulka 5.1: Základní vlastnosti vybraných protokolů IEEE 802.11

Protokol	Frekvence [GHz]	Maximální přenosová rychlost [Mbit/s]	Modulační technika
IEEE 802.11b	2,4	11	DSSS
IEEE 802.11a	5	54	OFDM
IEEE 802.11g	2,4	54	OFDM
IEEE 802.11n	2,4/5	150	MIMO-OFDM
IEEE 802.11ac	5	1000	MIMO-OFDM

Ke správnému fungování bezdrátové sítě je zapotřebí napojení na páteřní síť poskytovatele internetu. Pro přenos dat mezi přístupovými body se využívá nejčastěji Ethernet. Dále je zapotřebí přístupový bod AP (*Access Point*), který zajišťuje bezdrátový přístup k síti poskytovatele dat. Stanice je pak jakékoliv zařízení vybavené Wi-Fi modulem a může komunikovat s AP. Topologie může být buď infrastrukturní s jedním AP a několika připojenými stanicemi k tomuto

prvku nebo jako zapojení ad-hoc. Stanice komunikují spolu navzájem a není zapotřebí dalšího prostředníka.

Bylo definováno hned několik IEEE 802.11 protokolů. Liší se od sebe přenosovou rychlostí, použitou modulační technikou, frekvencemi apod. Novější protokoly používají techniku MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), které významně navyšují přenosovou rychlost. Jednoduchý popis standardů se nachází v tabulce 5.1. [17, 18]

Na frekvenci 2,4 GHz pracují ještě známé bezdrátové osobní sítě s malým dosahem WPAN (*Wireless Personal Area Network*) Bluetooth a ZigBee, takže je možné v této práci provádět měření s anténami podporující tyto protokoly.

6 Návrh a konstrukce měřicího pracoviště

Hlavním cílem praktické části této diplomové práce je návrh a následná konstrukce pracoviště, pomocí kterého bude možné měřit útlum šířeného signálu skrze určitou překážku. Pro svou práci jsem vyhledával a dále zpracoval informace o dvou různých přístupech ke konstrukci pracoviště. První, a nakonec použitý, přístup je vytvoření dvou boxů totožných rozměrů vyrobených z vodivého stínícího materiálu, v našem případě z pozinkovaného plechu, mezi něž se pak umístí dostatečně silná překážka. Tato překážka se poté přichytí ke konstrukci pracoviště pomocí svorek s nevodivými kontakty. Díky tomuto sestavení bychom měli být schopni změřit úroveň signálu na přijímací straně pracoviště a vypočítat tak útlum přes překážku.

Druhý způsob je vytvoření boxu ze stínícího materiálu, jehož vnitřní strany budou pokryty z materiálu absorbující elektromagnetické záření. Tímto lze zajistit, že měření nebudou ovlivňovat odražené vlny od stěn boxu a veškerá energie bude nasměrovaná do překážky. Doprostřed tohoto boxu by se pak vložila překážka v rozměrech boxu. Oba tyto přístupy budou v této části popsány, nicméně zaměřím se především na konstrukci plechového boxu, pomocí něhož se bude měřit útlum signálu.

6.1 Návrh plechového boxu

Pro potřeby korektního měření bylo zapotřebí zajistit řadu parametrů, které by měly na výsledky měření špatný vliv. Bylo zapotřebí najít materiál s relativně nízkou hmotností a rozměry musely odpovídat alespoň minimálním vypočítaným hodnotám hranice mezi blízkým a vzdáleným polem a taktéž první Fresnelově zóně, která musí být uvnitř boxu obsažena. Skutečné rozměry jsou tedy o něco větší než vypočítané minimální rozměry zmíněných parametrů.

6.1.1 Použitý materiál

Konstrukce obou boxů a stěn pro přichycení antén musela být vyrobena z materiálu, který dobře izoluje rušivé elektromagnetické pole působící v okolí měřicího pracoviště a pokud možno také lehký. Volba padla na přesně nasříhané a upravené ocelové plechy, které jsou následně žárově pozinkovány. Tato povrchová úprava plechu zajistí ochranu proti korozi, mechanickému poškození a díky menší tloušťce a relativně nízké hmotnosti pozinkovaného plechu pak bude sestavování a následná manipulace s boxy jednodušší. [19]

Spojování plechů je pak možno provést pomocí nýtování, spojovacími šrouby, obrubováním apod. Spojení těmito způsoby neovlivňuje pozinkovanou vrstvu, tedy ani ochranu proti korozi. Druhým způsobem je použití tavného svařování, zde ale dojde k porušení pozinkované vrstvy a tak je doporučeno potřít svařované místo ochranným zinkovým nátěrem. [19]

Největším problémem při manipulaci a sestavování plechového boxu je bezpečnost. Kvůli malé tloušťce se zde nachází ostré hrany, kde může při špatné manipulaci či nešikovnosti dojít

k poranění. Na nejrizikovější místa a hrany konstrukce je proto vhodné nasazovat nejlépe PVC gumové lemovky, případně tyto místa fyzicky seříznout a zabrousit.

6.1.2 Rozměry pracoviště

Při výpočtech rozměrů pracoviště jsem se zaměřil na dva parametry, které při nesplnění určitých mezních podmínek mohou významně znehodnotit postup měření, jeho výsledky a zhodnocení. Zaprvé je nutno obsáhnout co největší část vyzářené energie antény do vzdáleného pole antény, neboť teprve v této oblasti platí žádané anténní parametry včetně měřeného útlumu signálu. Zadruhé bylo nutné vypočítat poloměr 1. Fresnelovy zóny mezi anténním spojením. V této oblasti je přenášeno nejméně 60% energie, tudíž musí být šířka a výška pracoviště větší než vypočítaný průměr 1. Fresnelovy zóny.

Výpočet hranice blízkého a vzdáleného pole

Vzorec 2.6 se použil pro výpočet hranice mezi blízkým zářivým polem a vzdáleným polem. Vlnová délka se určila z frekvencí, pro které se bude měřit útlum. Jedná se o frekvence v rozmezí 1710 – 2690 MHz. Vybraná anténa umožňuje vysílat a přijímat na všech vybraných frekvencích.

Rozměr D je největší rozměr části antény, která vyzařuje energii do prostoru. V tomto případě bylo potřeba anténu rozebrat, protože výrobce uvádí pouze rozměry krytu antény. Jakmile jsem počítal s rozměry udávaných výrobcem, byly by výsledné rozměry pracoviště příliš velké a zkomplikovalo by to měření. Nejdelší část antény měřila 7,5 cm, počítal jsem tedy s touto hodnotou.

Výpočet pro frekvenci 1710 MHz

$$R_2 = \frac{2D^2}{\lambda} = \frac{2 * 0,075^2}{0,1754} = 0,0641m$$

Protože je největší rozměr antény D menší než vlnová délka, musí se k vypočítané hodnotě přičíst hodnota jedné vlnové délky. Výslednou hodnotou tak je $0,2396 \text{ m} = 23,96 \text{ cm}$.

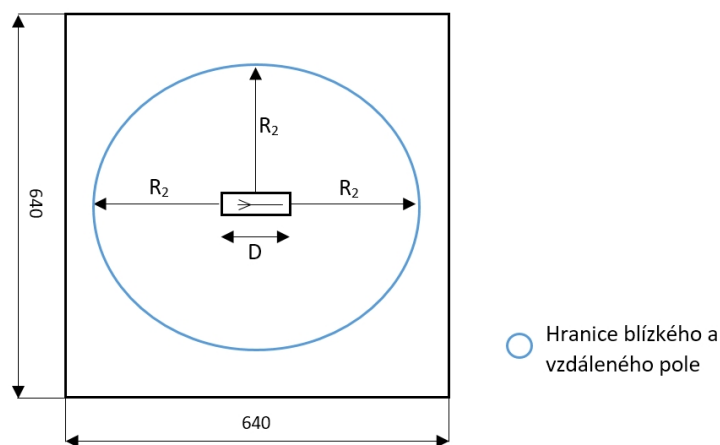
Výpočet pro frekvenci 2690 MHz

$$R_2 = \frac{2D^2}{\lambda} = \frac{2 * 0,075^2}{0,1115} = 0,1009m$$

Protože je největší rozměr antény D menší než vlnová délka, musí se k vypočítané hodnotě přičíst hodnota jedné vlnové délky. Výslednou hodnotou tak je $0,2124 \text{ m} = 21,24 \text{ cm}$.

Pro frekvenci 1710 MHz vyšla hranice Fraunhoferovy oblasti větší než v případě frekvence 2690 MHz, po zaokrouhlení 24 cm. Energie se však nešíří pouze z osy zářiče, ale z celé jeho

plochy. Je proto nutné si uvědomit, že vzdálenost hranice blízkého a vzdáleného pole se musí počítat z kraje zářiče, viz znázornění na obrázku 6.1.



Obrázek 6.1: Znázornění hranice blízkého a vzdáleného pole vyzařované vybranou anténou a pro frekvenci 1710 MHz (pohled na pracoviště - nárys)

Z obrázku 6.1 je patrné, že skutečné rozměry pracoviště jsou na každou stranu o několik centimetrů větší než v případě vypočítaných parametrů. Důvodem je ponechání určité rezervy, např. pro případ budoucího použití jiné antény s větším rozměrem D . Při vyzařování antény do vnitřního prostoru je rezerva ještě větší, protože výška antény je 3,8 cm a hranice blízkého a vzdáleného pole je tak okolo 30 cm. S dostatečnou tolerancí je možné pro měření nasadit anténu s největším rozměrem $D = 9$ cm.

Konečné vnitřní rozměry se ustálily na hodnotě 64 cm jak pro šířku, tak pro výšku boxu. Délka boxu nemusela být tak velká, anténa do prostoru zasahuje pouze 4 cm. Poslední rozměr jsem tedy určil na 50 cm.

Výpočet Fresnelovy zóny

Fresnelova zóna je dalším parametrem, jehož výpočet bylo nutno vypočítat. Tento výpočet je proveden pomocí vzorce 2.8. Důležitou proměnnou jsou vzdálenosti obou antén od překážky. Tyto vzdálenosti jsou vždy stejné. Jelikož je výška antény 4 cm a délka celého boxu je určena na 50 cm, tak proměnné $d_1, d_2 = 46$ cm. Vlnové délky jsou vybrány pro krajní měřené frekvence 1710 a 2690 MHz.

Výpočet 1. Fresnelovy zóny pro frekvenci 1710 MHz

$$r_1 = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} = \sqrt{\frac{1 * 0,1754 * 0,46 * 0,46}{0,46 + 0,46}} = 0,2m$$

Výpočet 1. Fresnelovy zóny pro frekvenci 2690 MHz

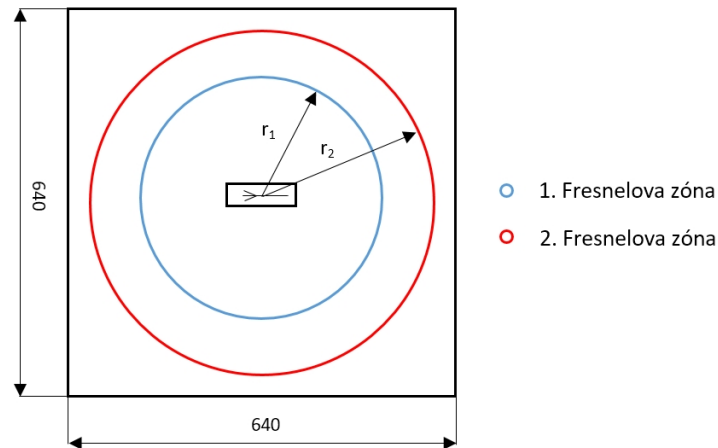
$$r_1 = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} = \sqrt{\frac{1 * 0,1115 * 0,46 * 0,46}{0,46 + 0,46}} = 0,16m$$

Fresnelova zóna se pro vyšší frekvence zmenšuje, hraniční hodnotou je tedy frekvence 1710 MHz. Průměr 1. Fresnelovy zóny je tak 40 cm, což vyhovuje výše určeným parametrům 64 cm. Dále můžeme zjistit, zda se v tomto rozmezí vytvoří i 2. Fresnelova zóna.

Výpočet 2. Fresnelovy zóny pro frekvenci 1710 MHz

$$r_2 = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} = \sqrt{\frac{2 * 0,1754 * 0,46 * 0,46}{0,46 + 0,46}} = 0,284m$$

Průměr 2. Fresnelovy zóny je roven 56,8 cm, tudíž i tato zóna je zde obsažena. Přes překážku se tímto přenese více energie a měření útlumu bude přesnější.



Obrázek 6.2: Znázornění 1. a 2. Fresnelovy zóny pro frekvenci 1710 MHz a vzdálenosti od překážek d_1 a d_2 46 cm (pohled na pracoviště - nárys)

6.2 Konstrukce plechového boxu

I přes optimalizaci rozměrů zmíněných v předchozí kapitole, by se s boxem vyrobeného z jednoho kusu s rozměry 64x64x50 cm špatně manipulovalo a převáželo na pracoviště. Jeden box se tak bude postupně skládat ze tří různých částí. Dvě části s tvarem do „L“ se nejdříve přišroubují k sobě a vytvoří hlavní konstrukci boxu. Na přední stranu boxu se pak přišroubuje plechové víko, kde z vnitřní strany bude připevněná anténa. Rozdělení na tři části umožní lepší přenositelnost a skladovatelnost pracoviště v laboratoři. Nevýhodou je pak doba na sestavení obou boxů.

Konstrukce hlavních dílů

Jak jsem již zmínil výše, hlavní část boxu se skládá ze dvou totožných částí, které se pak šrouby připojí k sobě. Tvar jednoho kusu tak vytváří dvě strany zkompletovaného boxu se stejným vnitřním rozměrem 640 mm. Tento rozměr můžeme označit jako šířku a výšku boxu. Strany jsou pak obdélníkového tvaru s rozměry 640x500 mm, přičemž 500 mm je dříve vypočítaná délka jednoho boxu. Tloušťka plechu byla stanovena na 0,8 mm.

Na konci jedné strany se pak nachází kus plechu obdélníkového tvaru v rozměrech 500x30 mm, který je ohnutý směrem do vnitřní strany pracoviště a nacházejí se v něm otvory pro přišroubování druhého dílu. Otvorů je celkem 5, přičemž krajní jsou vzdáleny od levého, resp. pravého okraje plechového dílu 50 mm a ostatní mají mezi sebou rozestup 100 mm. Kvůli šířce přídavného křídla 30 mm jsou umístěny otvory ve vzdálenosti 15 mm od horního okraje dílu. Pro montáž boxu jsou použity šrouby o průměru 6 mm, tudíž průměr otvorů je 6,5 mm. Stejný počet otvorů v totožných rozměrech se poté nacházejí i na druhé straně dílu.

Dalším důležitým prvkem jsou přídavná křídla, která se nacházejí na každé straně a to na okrajích, které měří 640 mm. Rozměry těchto křídel jsou 640x30 mm. Slouží jednak pro snadné montování víka, kde je umístěná anténa, a dále pro přichycení překážky k oběma boxům, případně pro montáž obou boxů k sobě. Tyto křídla jsou ohnutá směrem ven z pracoviště. Na každém křídle je vyvrtáno 6 otvorů, přičemž krajní otvory jsou vzdáleny od levého, resp. pravého okraje křídla 50 mm, ostatní jsou mezi sebou vzdáleny 108 mm. Stejně jako u vnitřního křídla se otvory umísťují ve vzdálenosti 15 mm od horního okraje a průměr otvorů je 6,5 mm.

Konstrukce víka

Byly vyrobeny 2 kusy plechových vík pro připevnění antény a následné montáži na konstrukci boxu. Víko je nařezáno ve tvaru čtverce v rozměrech 700x700 mm, protože k vnitřnímu rozměru boxu 640 mm nutno na každou stranu připočítat rozměr vnějšího křídla pro našroubování víka. Otvory pro našroubování víka ke konstrukci musí souhlasit s otvory na vnějších křídlech. Od horního okraje každé strany jsou otvory vzdálené 15 mm. Od levého a pravého okraje jsou pak otvory vzdálené 80 mm, mezi sebou mají rozestupy o vzdálenosti 108 mm. Průměr děr je 6,5 mm, stejně jako u otvorů na vnějších křídlech. Na výrobu byl použit pozinkovaný plech o tloušťce 0,8 mm.

Dále bylo nutné vyřešit umístění a upevnění antény na víko. Antény musí být ve stejné výšce, nejlépe uprostřed víka. To nám zajistí žádané obsažení vyzářené energie antény do vzdálené oblasti antény. Anténa se bude k víku šroubovat, i když je možné ji zde i nalepit, ale v případě častého sundávání antény se lepící vrstva opotřebuje. Rozteč mezi otvory v anténě je 107,5 mm. Délka antény je 117 mm, šířka pak 49,5 mm. Vzdálenost mezi okrajem antény a odpovídajícími okraji víka musí být 291,5 mm a 325 mm. Tyto vzdálenosti platí i pro protější strany. Otvory pro zašroubování antény mají průměr 3,5 mm. Jsou použity šrouby o průměru 3 mm.

Vývod kabelu antény je vyřešen pomocí otvoru, který chrání gumová průchodka. Otvor má průměr 12 mm, což je dostatečná hodnota pro průchod kabelu včetně použitého konektoru SMA-m, a je vyvrtán ve vzdálenosti 22 mm od středu otvoru použitého pro zašroubování antény a to vždy na pravé straně při pohledu z vnější strany víka.

Na obrázku 6.3 je vyfoceno již složené měřicí pracoviště včetně osazení vybranými anténami. Nákrasy jednotlivých součástí měřicího boxu jsou pak znázorněny v příloze A.



Obrázek 6.3: Složené měřicí pracoviště

6.2.1 Výroba boxu a cena materiálu

Výroba byla zadána strojírenské firmě zaměřující se na zpracování plechů TopCNC s.r.o. se sídlem v Ostravě-Kunčicích [topcnc]. Samotná výroba všech součástí trvala 7 pracovních dní od zadání návrhu. Jako spojovací materiál potřebný k sestavení pracoviště se použily šrouby z pozinku a šestihranou hlavou. Průměr šroubů je 6 mm, délka šroubu 16 mm. Pro uchycení šroubu se použily křídlové matice pro průměr 6 mm. Dále jsem nakoupil 4 stolní svorky pro připevnění překážky k oběma stranám boxů v rozměrech 200x50 mm.

Cena celého měřicího pracoviště byla 2619 Kč vč. DPH, celková cena včetně šroubů, matic a stolních svorek se pak pohybovala okolo 3000 Kč vč. DPH.

6.3 Řešení boxu s využitím absorbérů

Použití boxu vyrobeného z pozinkovaného plechu sice představuje velmi dobrou elektromagnetickou izolaci při měření anténních parametrů, ale neeliminuje vliv mnohocestného signálu. Pro

přesnější měření by bylo nutné obložit všechny vnitřní stěny pracoviště absorpčními materiály, pomocí kterých by se pak jednalo o plně bezodrazovou komoru. Signál by se tak neměl šířit ven z komory, ani by se neměl odrazet zpět do vnitřního prostoru boxu. Jedná se o nejčastější řešení podobného problému při měření ve stínících komorách.

Díky instalaci absorbérů elektromagnetického záření se vlna dopadající na rozhraní absorpčního materiálu a vnitřního prostoru boxu utlumí. Energie elektromagnetické vlny se poté přemění na teplo. Toto je možné s využitím dielektrických nebo magnetických ztrát. V současnosti se používají spíše dielektrické ztrátové materiály, protože materiály magnetické se nevyplátí z hlediska ceny a také váhy absorbérů. Ztrátová dielektrika používaná pro tuto činnost by měla mít nízkou hodnotu relativní permitivity ε_r , aby se blížila vlastnostem volného prostoru, tedy vzduchu. Jsou tak použity pěnové materiály z polystyrénu, polypropylénu či polyuretanu, které se ještě plní elektrovodivými přípravky.

Většinou se absorbéry skládají z několika vrstev skládaných k sobě podélně, kde je nejmenší hodnota permitivity ε_1 na rozhraní s vnitřním prostorem komory a postupně stoupá až do vrstvy nalepené na vodivém vnějším materiálu, kde se absorbuje nejvíce přenášené energie a zbylou energii odrazí zpět do prostoru komory. Absorbéry se přilepují ke stěně komory lepidlem. Vyrábí se v různých tvarech, nejčastěji fólie různého materiálu a velikostí nebo jako jehlanovité vstupující do prostoru. Tloušťka a váha materiálu závisí na nejnižší tlumené frekvenci. V případě vyšších frekvenčních pásem se tloušťka materiálu pohybuje v jednotkách centimetrů, v případě frekvencí ve stovkách MHz jsou absorbéry tlustší a hlavně těžší. [20, 21]

Kvalitativním parametrem při porovnání jednotlivých materiálů se nazývá útlum odrazu RL (*Return Loss*). Někdy je označován pod pojmem reflektivita. Veličina je popsána vztahem [20]:

$$RL = 10 \log \left(\frac{P_{odr}}{P_{dop}} \right) = 10 \log |\rho_{vst}|^2 = 20 \log |\rho_{vst}|, \quad (6.1)$$

kde: RL	útlum odrazu [dB]
P_{odr}	výkon odražené vlny [W]
P_{dop}	výkon dopadající vlny [W]
ρ_{vst}	vstupní činitel odrazu celého absorpčního obkladu na daném kmitočtu [-]

6.3.1 Dielektrické absorbéry

Tyto absorbéry jsou pro svou nízkou hmotnost a jednoduchou montáž, např. přilepením suchým zipem nebo nalepením na stínicí panel, nejlepším řešením pro aplikaci těchto materiálů jako prvků tlumících elektromagnetické vlny. Nejpoužívanějším materiálem absorbérů využívajících dielektrických ztrát tvrzená polyuretanová pěna, která je po zpracování dostatečně flexibilní. Způsoby získávání elektricky vodivých vlastností se mohou mezi výrobci lišit. Většinou se jedná o impregnaci vodivého přípravku na pěnu, např. nanášení grafitových přísad. Tento typ absorbérů je levnější než polymerové absorbéry plněné magnetickými plnivými. Pěnové absorbéry

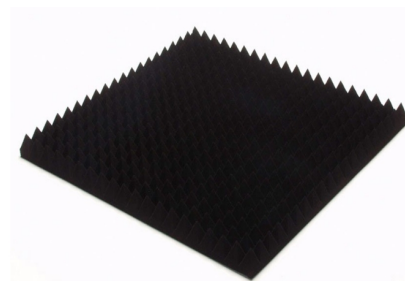
nejdou voděodolné, pro venkovní užití je tak nutné použití speciálního nátěru. Je možná úprava řezáním.

Vyrábí se ve formě plochého absorberu nebo ve formě pyramidového absorberu, lišících se ve velikostech a tvarech. Pyramidový absorber se dělá nejčastěji ve tvaru jehlanu nebo kuželu. Výhodou pyramidového absorberu je jejich vlastnost, kdy při odrazu vlny od jednoho z jehlanů směřuje odražená vlna do sousedního jehlanu. Celý děj se několikrát opakuje a energie odražené vlny je několikanásobně menší než v případě plochých absorberů (až k 70 dB). Pro správnou funkci absorberů ve tvaru jehlanu je důležité velikost jednotlivých jehlanů. Ta by měla činit minimálně čtvrtinu vlnové délky ($\lambda/4$) pro nejnižší možnou pracovní frekvenci.

Výhodou plochých absorberů je možnost skládání jednotlivých vrstev na sebe, umožňující tak lepší absorpční vlastnosti. Velikost útlumu v tomto případě může přesahovat 20 dB. Tloušťka materiálu se opět liší od výrobce, nejčastější případy se pohybují od jednotek milimetrů až po několik desítek centimetrů, pro velmi vysoký útlum na nízkých frekvencích okolo 1 GHz. [20, 22]



Obrázek 6.4: Příklad plochého vícevrstvého pěnového absorberu [28]



Obrázek 6.5: Příklad pyramidového absorberu s výškou jehlanů 5 cm [28]

Pro testovací pracoviště je nejvýhodnější použít ploché absorbery. Pyramidové absorbery by zasahovaly příliš do volného prostoru měřicí komory a také jejich váha je vyšší než v případě plochého absorberu. Jejich cena se zvětšuje s počtem a výškou jehlanů na jednom kusu. Mezi výrobce těchto výrobků patří Laird Technologies (typy ECCOSORB AN a ECCOSORB LS) [23], ARC Technologies [24], MAST Technologies (typ MF2) [25] nebo Holland Shielding (pyramid absorber 3640) [26]. Standardní rozměry tohoto typu jsou 60x60 cm, u pyramidového absorberu se velikosti různých typů liší. Pro boxy o rozměrech navržených v kapitole 6.1.2 by bylo potřeba minimálně 5 kusů absorberů ve standardních rozměrech. Ceny se pohybují od zhruba 1500 Kč až po 5000 Kč to vše bez daně a dalších poplatků za přepravu.

6.3.2 Magnetické absorbery

Absorbery využívající magnetických ztrát mohou být navrženy pro absorbování buď jedné frekvence nebo pro celé spektrum frekvencí. Na které frekvenci má daný absorber nejvyšší odrazivost závisí na tloušťce vrstvy a míře magnetického plniva v materiálu. Magnetické absorbery pak pracují na principu potlačení fáze. Při dopadu vlny na materiál se část vlny odrazí zpět a část se přenáší dále. Přenášená část se několikrát uvnitř absorberu odrazí a vznikne několik nových vln,

které jsou fázově otočeny o 180° oproti odražené vlně. Součet vzniklých vln se rovná amplitudě odražené vlny. V praxi může dojít k odrazivosti větší než 30 dB.

Velkou výhodou těchto absorbérů je jejich velikost a nízká tloušťka materiálu. Výsledný materiál by měl co nejvíce flexibilní, je tak většinou vyroben ze silikonové či uretanové pryže nebo syntetické pryskyřice. Jako plnidlo do těchto materiálů se používá ferit, železo nebo vzácné slitiny, z toho plyne i jejich velká váha. [22, 27]

Kvůli své váze se tyto absorbéry prodávají na trhu většinou ve velikosti 21x29,7 cm, případně 30x30 cm. Cena materiálu pro mnou potřebné frekvence od 1710 MHz do 2690 MHz se pohybuje okolo 1000 Kč bez daně, ale vzhledem k velikosti by bylo potřeba několik desítek fólií, tím bychom se dostali k ceně až 30000 Kč.



Obrázek 6.6: Příklad magnetických absorbérů [28]

7 Příprava pro měření vlivu překážek na rádiový signál

Po vyrobení měřicího pracoviště bylo nutné se rozhodnout, jaký typ překážek se bude proměřovat. Dále se musely vybrat antény pro vysílání a příjem signálu a navrhnout správnou metodiku měření, umožňující korektní měření útlumu signálu přes překážku.

7.1 Výběr překážek

Při výběru překážek se muselo reflektovat zejména jejich využití v budovách, ať už jako různé betonové nebo sádrokartonové příčky a okna, nebo jako nábytek a jiné vybavení interiéru. Také bylo vhodné vybrat materiály, kde se útlum dobře projeví. U betonových příček by se útlum projevil ze všech materiálů použitých v zástavbě nejvíce, ale zde narazíme na logistické problémy ohledně skladování a samotné výroby takovéto překážky. Bylo by potřeba zeď z betonových tvarovek, případně pálených cihel, postavit v rozměrech minimálně 64x64 cm nebo větší, aby se celá zeď zakrývala celý prostor komory.

Bylo tedy nutné si opatřit typy překážek, které vyhovují svými rozměry, a tím i svou vahou. Překážky by se také měly dát v laboratoři dobře skladovat. Zvolilo se tedy tři základní typy překážek používaných v budovách a zástavbě. Konkrétně se jedná o standardní sádrokartonové desky, dřevěné desky z masivního dřeva, popřípadě jeho alternativou (laťovky) a izolační dvojsklo, včetně pokovené vrstvy.

7.1.1 Sádrokartonové desky

Pro sádrokartonové desky jsem se rozhodl z toho důvodu, že jsou díky své lehké konstrukci snadno manipulovatelné. Základním stavebním prvkem sádrokartonu je lisovaná sádrová hmota, která je vložena mezi dva dostatečně silné papírové kartony. Toto složení zajišťuje tepelnou a zvukovou izolaci.

Pro potřeby měření byly zajištěny dvě stavební sádrokartonové desky typu RB (A) nařezané na rozměry 70x70 cm, aby se daly snadno vložit mezi oba boxy. Tloušťka jedné desky je 12,5 mm. Každá z desek má oblepené všechny hrany lepící páskou, kvůli případným odpadajícím kusům sádry.

7.1.2 Dřevěné desky

Jako dřevěné desky jsem vybral konstrukční desku, laťovku. Vyrábí se oboustranným překlížením laťovkového jádra loupanými dýhami (poddýžka). Jádro laťovek tvoří především dřevo ze smrku, borovice nebo jedle. Poddýžka je pak z různých dřevin, např. topol, bříza, buk. Tyto desky jsou určeny do suchého, vnitřního prostředí na obklad stěn, výrobu nábytku a dveří, zařizování interiéru apod. [29]

Stejně jako u sádrokartonu jsem pro měření použil dvě desky surových laťovek. Rozměry jsou 70x70 cm, pro snadné vložení mezi boxy. Tloušťka materiálu je 25 mm. Každá hrana desek byla

navíc oblepena dýhovou nažehlovací páskou pro ochranu vůči případným odlepující se třískám dřeva.

7.1.3 Izolační dvojsklo

Izolační dvojsklo je výrobek ze dvou čirých skel. Mezi tyto skla je vložen distanční rámeček, kde je uložen vysoušecí prostředek, který by měl absorbovat vodní páry z meziskelního prostoru. Velikost rámečku se pohybuje od 6 do 16 mm. Po obvodu dvojskla se nachází pružný tmel, který utěsní meziskelní prostor. Izolačních vlastností se dosahuje pokovením jednoho ze skel z vnitřní strany a přidáním vzácného plynu (argon, krypton) do meziskelního prostoru. Izolační s pokovenou vrstvou se používají do dřevěných, plastových oken nebo eurooken. [30]

Pro potřeby měření jsem si nechal vyrobit izolační dvojsklo s pokovenou vrstvou v rozměru 70x70 cm. Celková váha skla je okolo 10 kilo. Bylo potřeba ještě zajistit ochranu proti ostrým hranám dvojskla. Po obvodu byla nejprve nalepena pěnová lepicí páska a poté se každá z hran přelepila dvakrát průhlednou lepicí páskou.



Obrázek 7.1: Vybrané typy překážek, zleva: sádkarton, dřevěné desky, izolační dvojsklo

7.2 Metodika a optimalizace měření

Jedním z cílů práce je zpracovat soubor měření vlivu překážek na rádiový signál pomocí vytvořeného měřicího pracoviště. Během návrhu metodiky měření jsem musel řešit několik závislostí, které by při nedodržení mohli významně ovlivnit výsledky měření. Jedná se například o typ antény, která vysílá na ultra krátkých vlnách, minimální vzdálenost antény od překážky a stěn pracoviště, což bylo řešeno v kapitole 6.1.2, zajištění stejné vzdálenosti mezi anténami při měření síly signálu ve volném prostoru a při měření signálu přes překážku. Použitý typ antény je popsán v kapitole 7.3.1.

Měření jsem prováděl metodou konstantní vzdálenosti překážky od vysílače a přijímače. Vzdálenost mezi vysílací a přijímací anténou by tak měla stejná jak při kalibraci, tak při měření signálu průchodem přes překážku. Pracoviště je sestaveno tak, aby se překážky vkládaly mezi ně.

Při vložení překážky se tak prodlouží vzdálenost mezi anténami, což je nežádoucí efekt. Muselo se tedy vymyslet řešení, jak zastínit vzduchovou mezeru mezi překážkami při měření signálu bez překážky.

Řešením může být sestavení profilu ze stejného materiálu jako je pracoviště (pozinkovaný plech), který by se poté vkládal do vnitřního prostoru pracoviště. Tento profil by měl mít co nejpodobnější rozměry jako pracoviště (64x64 cm). Samozřejmě se musí brát ohled na způsob sestavení měřicí komory, kdy se v určitých místech kvůli konstrukci rozměr o několik milimetrů zmenší. Profil je široký 10 cm, aby mohl simulovat veškeré šířky překážek měřených v této práci. Ve vzdálenosti 2 cm od delší strany profilu je na vnější straně našroubován dřevěný hranol pro zpevnění konstrukce. Šířka hranolu je 12,5 mm, tudíž může při měření simulovat šířku sádkartonové překážky, která má stejný rozměr. V příloze D na obrázku D.8 je vyrobený profil zobrazen.

Dalším řešením pro optimalizaci pracoviště a vyřešení problému s konstantní vzdáleností je použití profilu, který by byl vložen jako mezikus mezi oba dva měřicí boxy. Tento profil by byl tvořen buď plechovou konstrukcí, jako je materiál pracoviště, nebo by se použila konstrukce ze dřeva a z vnitřních stran by byly připojeny kusy pozinkovaného plechu. Tyto profily by měly každý jinou tloušťku v závislosti na tloušťce překážky. Bylo by potřeba vytvořit profily alespoň pro sádkartonovou desku o tloušťce 1,25 mm a dřevěnou desku společně s dvojsklem, které mají shodnou tloušťku 25 mm. Pro dvě dřevěné desky položené za sebou by bylo třeba vyrobit profil o tloušťce 50 mm. Nevýhodou oproti předchozímu řešení je právě v tom, že by bylo potřeba vyrobit několik kusů takového profilu pro simulování všech požadovaných překážek, nepostačí pouze jeden nastavitelný. V příloze D jsou na obrázcích D.5, D.6 a D.7 zobrazeny vyrobené profily, které jsou vloženy mezi měřicí boxy.

Útlum se měřil na frekvencích odpovídajícím službám pracujících na UHF vlnách. Jedná se o služby GSM, UMTS, LTE a Wi-Fi. U každé telekomunikační služby jsem si vybral několik kanálů, kde jsem měřil frekvence jak pro downlink, tak pro uplink. U Wi-Fi jsem vybral kanály 1, 6 a 11. Všechny frekvence jsou zaokrouhleny na jednotky MHz. V tabulce 7.1 jsou znázorněny vybrané frekvence. [31]

Vybrané antény podporují i pásmo pro GSM 900, ale pro tyto frekvence neplatí podmínka pro vyzařování ve vzdálené oblasti uvnitř měřicí komory. To samé platí pro službu LTE pracující na frekvenci 800 MHz.

Pro svou práci se vzhledem k zařízením, jimiž je vybavena učebna, nabízí různé přístupy pro měření útlumu rádiového signálu. Prvním způsobem je použití spektrálního analyzátoru v režimu síťového analyzátoru s funkcí „Tracking Generator“, který dokáže na jednom portu generovat signál a na druhém portu měřit signál po průchodu překážkou. Druhým způsobem je použití externího signálového generátoru a spektrálního analyzátoru, kdy se nejdříve změří útlum bez překážky a poté s překážkou.

Tabulka 7.1: Výpis kanálů a jejich odpovídající frekvence, na kterých se provádělo měření

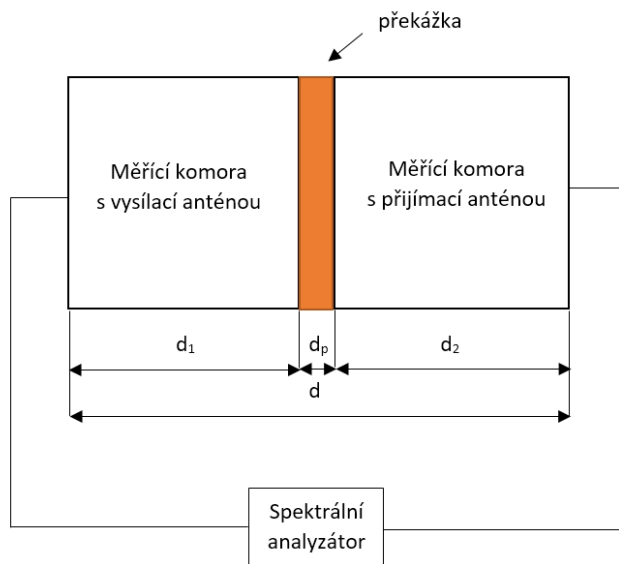
Služba	Označení kanálu (GSM – ARFCN, UMTS – UARFCN, LTE - EARFCN)	Měřená frekvence [MHz]
GSM 1800	512	1710
	697	1747
	885	1785
	512	1805
	697	1842
	885	1880
UMTS 2100	9614	1923
	9713	1943
	9812	1962
	10564	2113
	10663	2133
	10762	2152
Wi-Fi	1	2412
	6	2437
	11	2462
LTE 2600	20750	2500
	20950	2520
	21150	2540
	2750	2620
	2950	2640
	3150	2660

7.2.1 Metoda měření s použitím režimu „Tracking generator“

Hlavní použitou metodou bylo měření útlumu signálu pomocí režimu použitého spektrálního analyzátoru „Tracking generator“, který umožňuje generovat signál i měřit jeho útlum pomocí jednoho přístroje. Vysílací anténa se připojí do analyzátoru na port 2 s názvem „GEN RF output“, přijímací anténa se napojí na port 1 s názvem „RF input“. Při měření bez překážky se použije profil pro simulaci šířky překážky. Využívá se tzv. dvou portové kalibrace, která změří přijatou úroveň a tu pak nastaví jako výchozí hodnotu pro měření s překážkou. Po odstranění profilu a vložení překážky se útlum na obrazovce spektrálního analyzátoru změní. Hodnoty se měří v dB. Schéma měřicího pracoviště se nachází na obrázku 7.2. Postup měření je následující:

1. Sestavení měřicího pracoviště, připojení antén k přístroji a nakonfigurování správných parametrů ve spektrálním analyzátoru
2. Mezi oba boxy se vloží plechový profil s požadovanou šířkou testované překážky d_p , aby se zachovala stejná vzdálenost mezi anténami při měření bez překážky i s překážkou d .
3. Pomocí kalibrace se změří referenční hladina přijaté úrovně. Na analyzátoru je tato hladina zobrazena jako 0 dB.

- Po odstranění profilu se mezi komory vloží testovaná překážka a přichytí se svorkami.
- Na obrazovce se změní úroveň signálu a odečte se hodnota útlumu pro měřenou frekvenci. Není tak potřeba přepočítávat výsledek jako v předchozí metodě. Útlum do tabulek zapisují v kladných hodnotách.



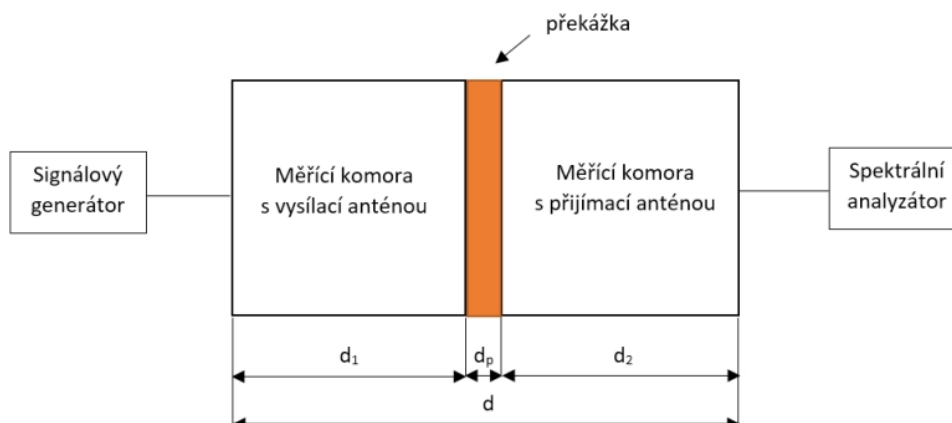
Obrázek 7.2: Schéma pracoviště měření signálu přes překážku při použití spektrálního analyzátoru s funkcí „Tracking Generator“

7.2.2 Metoda měření s externím generátorem signálu

Doplňkové měření tímto způsobem využívá separátního signálového generátoru, který generuje signál na určité frekvenci a o určené síle vysílaného signálu. Tato síla signálu musí být stejná pro všechna měření. Spektrální analyzátor se pak nastaví pro měření na frekvenci vysílané generátorem a změří se hodnota útlumu. Veškeré hodnoty se měřily v jednotkách dBm. Schéma měřícího pracoviště se nachází na obrázku 7.3. Postup měření je následující:

- Sestavení měřícího pracoviště, připojení antén k přístrojům a nakonfigurování správných parametrů na generátoru i v analyzátoru
- Mezi oba boxy se vloží plechový profil s požadovanou šířkou testované překážky d_p , aby se zachovala stejná vzdálenost mezi anténami při měření bez překážky i s překážkou d .
- Změřil se útlum signálu bez překážky v decibelech.
- Následně se profil z konstrukce odstranil a místo něj se vložila překážka. Ta se poté pevně přichytila ke konstrukci pomocí svorek.

5. Změřil se útlum signálu s vloženou překážkou v decibelech.
6. Do tabulek se zapsala jak hodnota útlumu bez překážky, tak s překážkou. Výsledný útlum se zapisoval v jednotkách dB a vypočítal se jako rozdíl přijaté úrovně signálu bez překážky a přijaté úrovně signálu s překážkou. Při správném měření by se měl útlum pohybovat v kladných hodnotách.



Obrázek 7.3: Schéma pracoviště měření signálu přes překážku při použití signálového generátoru a spektrálního analyzátoru

7.3 Použitá zařízení

Kromě vyrobeného měřicího pracoviště bylo nutné zajistit vysílací a přijímací anténu stejného typu a také díky zvoleným metodikám měřicí přístroje.

7.3.1 Anténa Paoli 680 GSM/LTE

Pro výběr antény byly nejdůležitější vysílané frekvence, které by měly obsáhnout všechny požadované technologie a její rozměry, kde mě zajímal hlavně nejdelší rozměrem zářiče antény kvůli výpočtům hranice blízkého a vzdáleného pole. Pro měření by také bylo lepší zvolit směrovou anténu, která by energii směřovala přímo do překážky. Bohužel jsem nemohl najít žádnou v rozumných rozměrech. Z těchto důvodů jsem se rozhodl pro výběr antény firmy Paoli verze 680.

Jedná se o všesměrovou anténu s příjmem na frekvenčních pásmech pro technologie AMPS (824-894 MHz), GSM (900 MHz), DCS-1800 (1800 MHz), PCS-1900 (1900 MHz), UMTS (2100 MHz), Wi-Fi (2400 MHz), LTE (791-862/1710-2690 MHz). Polarizace antény je lineární. Konektor je SMA-m s délkou kabelu 2,5 m. Největší rozměr zářiče antény je 7,5 cm. Montáž se provádí buď zašroubováním (pro pracoviště použitá montáž) nebo nalepením. V příloze C jsou uvedené základní technické parametry antény. [paoli]



Obrázek 7.4: Anténa Paoli 680 [32]

7.3.2 Spektrální analyzátor Rhode&Schwarz FSH8

Spektrální analyzátor Rhode&Schwarz FSH8 je schopný přijímat RF signál v rozsahu od 9 kHz až do 8 GHz. Díky tomuto rozsahu můžeme měřit všechny požadované frekvence. Jako vstup slouží dva porty na předním panelu, jeden označený jako „RF Input“ a druhý s označením „GEN RF output“. Oba tyto vstupy jsou osazeny konektorem N female. Na tyto konektory se připojila redukce N male/SMA-f, aby se zde mohli napojit antény osazené konektory SMA-m.

Analyzátor podporuje měření v několika módech, z nichž jsem použil dva pro jiné metodiky měření. Jsou to mód spektrálního analyzátoru a síťový analyzátor. Všechna měření se prováděla ve frekvenční doméně. Přijatá výkonová úroveň se měřila v jednotkách dBm. V režimu síťového analyzátoru se měří v jednotkách dB.

Při měření metodikou s použitím režimu „Tracking generator“ se spustil analyzátor v režimu síťového analyzátoru. Konfigurace tracking generátoru se provádí přes tlačítko AMPT. Výkon generovaného signálu se nastavuje pomocí „TG Attenuation“. Zde postačí nechat výchozí hodnotu 10 dB. Ostatní parametry můžeme změnit pro lepší vizualizaci signálu na obrazovce. Nastavení síťového analyzátoru se provádí v nabídce MEAS, kde se zvolí v „Meas Mode“ položka „Scalar“ a v „Result Display“ položky „Transmission Rev“, což jsou přednastavené hodnoty. Dále se nastaví pomocí tlačítek FREQ a SPAN měřená frekvence a frekvenční rozlišení. Pro zpřesnění měření je možné použít pomocí tlačítek TRACE a „Trace Mode“ položku „Average“, která zprůměruje v určitém počtu kroků hodnotu pro danou frekvenci. Pro své měření jsem vybral počet kroků 20. Vrátime se zpět stisknutím „Meas Mode“ do nabídky pro měření a můžeme provést dvou portovou kalibraci. Hodnotu útlumu jsem poté zjistil pomocí markeru.

Měření metodikou s externím generátorem signálu se provádělo v režimu spektrálního analyzátoru. Z nabídky „Meas Mode“ se zvolí položka „Channel power“. Poté se nastavila frekvence, na které druhá anténa vysílá, a frekvenční rozlišení podobně jako v předchozí metodice. Pro zpřesnění měření se v nabídce „Trace Mode“ zvolila položka „Average“, která zpřesní měření.



Obrázek 7.5: Spektrální analyzátor Rhode & Schwarz FSH8 [33]

Počet kroků jsem nastavil na 20. Naměřená hodnota úrovně signálu se zobrazila v horní polovině displeje pod názvem „Power“. [33]

7.3.3 Signálový generátor Rhode&Schwarz SMB 100 A

Přenosný signálový generátor Rhode&Schwarz SMB 100 A umožňuje generovat radiofrekvenční signál ve frekvenčním rozmezí od 9 kHz až do 3,2 GHz. Síla vysílaného signálu dosahuje úrovně od -145 dBm až do 30 dBm. Na předním panelu je umístěn 50Ω RF konektor typu N-female. Na tento konektor je potřeba nasadit redukci N-male/SMA-f, aby zde mohla být přivedena anténa.

Generátor se používal při měření metodikou s externím generátorem. V nastavení se vybral blok RF, který umožňuje generovat signál o určité frekvenci a síle. Dále už se pomocí tlačítka FREQ nastavila požadovaná frekvence a pomocí tlačítka LEVEL se nastavila úroveň vysílaného signálu. Tato úroveň musela být pro každé měření totožná. [34]



Obrázek 7.6: Signálový generátor Rhode & Schwarz SMB 100 A [34]

8 Praktické měření vlivu překážek na rádiový signál

Praktické měření útlumu rádiového signálu přes překážky pomocí měřicího pracoviště proběhlo během několika měření s různými metodami pro optimalizaci měření a také pomocí dvou různých metodik měření. Hlavní metodikou měření bylo použití spektrálního analyzátoru v režimu síťového analyzátoru. Tato metodika je ve výsledku přesnější, než měření se signálovým generátorem, zaměřil jsem se tedy na tuto metodu. Pro optimalizaci měření se využívalo jak vyrobeného plechového profilu vkládaného do vnitřního prostoru obou boxů, tak i mezikusů, které se vkládaly mezi obě měřicí komory. Při vkládání těchto mezikusů není potřeba při měření pohybovat s boxy, tato metoda by tedy měla nabídnout přesnější výsledky.

Útlum se měřil na následujících překážkách:

- Stavební sádrokartonová deska RB (A) – rozměr 70x70x1,25 cm
- Dvě za sebou položené stavební sádrokartonové desky RB (A) – rozměr 70x70x2,5 cm
- Dřevěná deska (laťovka) – rozměr 70x70x2,5 cm
- Izolační pokovené dvojsklo – rozměr 70x70x2,5 cm

V následujících podkapitolách budou následovat naměřené hodnoty útlumů na daných frekvencích a měřených danou metodikou měření. Všechny výše uvedené překážky byly měřeny metodikou se spektrálním analyzátozem a dvou portovou kalibrací. Pouze měření s jednou sádrokartonovou deskou a jednou dřevěnou deskou byly měřeny metodou s externím signálovým generátorem, takže výsledky tohoto měření budou následovat ke konci kapitoly.

V příloze D jsou pak uvedeny fotografie z měření včetně fotografií použitých optimalizací.

8.1 Měření útlumu sádrokartonové desky

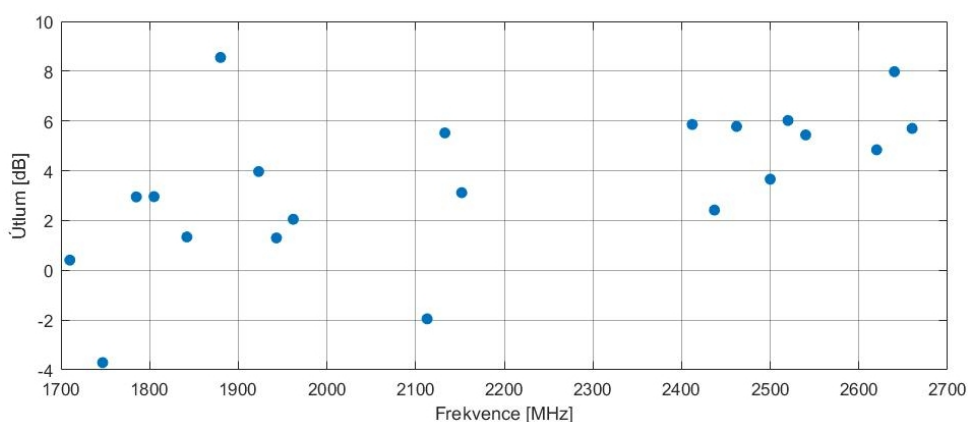
Měření se sádrokartonovou deskou bylo referenčním měření pro vyzkoušení různých nastavení parametrů ve spektrálním analyzátoru FSH8 či optimalizací měřicího pracoviště. Nastavené parametry analyzátoru pro uvedená měření jsou shodná s parametry nastavenými v kapitole 7.3.2. Pro sádrokartonovou desku jsem naměřil hodnoty útlumu jak s vnitřním plechovým profilem, tak i s mezikusem o tloušťce 1,25 cm vkládaného mezi komory.

8.1.1 Optimalizace plechovým profilem

Pro tuto sadu měření útlumu přes sádrokartonovou překážku jsem využil pomocného plechového profilu vloženého do vnitřního prostoru obou boxů. Profil pak při kalibraci simuluje tloušťku překážky, která je 1,25 cm. Naměřené hodnoty pro dané frekvence jsou vypsány v tabulce 8.1 a znázornění naměřeného útlumu na frekvenčních nosných pak na obrázku 8.1. Celkový průměr útlumu se vypočítal pouze z kladných hodnot, které určují útlum signálu.

Následuje vzorové měření sádrokartonové desky s optimalizací plechovým profilem pro frekvenci 1710 MHz. Postup při měření je následující:

1. Nejprve je nutné sestavit měřící pracoviště a připojit obě antény ke spektrálnímu analyzátoru. Dále se vloží vnitřní plechový profil mezi oba boxy tak, aby mezi boxy byla mezera 1,25 cm na vložení sádrokartonové překážky.
2. Dále se musí nastavit parametry ve spektrálním analyzátoru. Použije se síťový režim („Network Analyzer“), nastaví se frekvence na 1710 MHz, frekvenční rozpětí se nastaví na 20 MHz. Pomocí TRACE se nastaví trasování „Average“ s počtem kroků 20. Ostatní parametry jsou již nastaveny implicitně.
3. Pomocí softkey „Calibration“ v menu „Meas“ se provede dvou portová kalibrace a na spektrálním analyzátoru bude vyznačena hladina 0 dB odpovídající zkalibrované úrovni signálu bez překážky.
4. Následně se provede vyjmutí profilu z boxů a mezi boxy se vloží sádrokartonová překážka.
5. Na spektrálním analyzátoru se změní zkalibrovaná hodnota a pomocí markeru, který nastavíme na frekvenci 1710 MHz, odečteme hodnotu útlumu. Pro ostatní frekvence a překážky se tento způsob měření se spektrálním analyzátozem opakuje.



Obrázek 8.1: Znázornění naměřených útlumů přes sádrokartonovou desku s optimalizací plechovým profilem

Jak lze vypožorovat z útlumů měřených frekvenčním spektrem, není zde přítomen očekávaný lineární zvyšování průběhu útlumu, naměřená data se mění skokově. Navíc se zde na frekvencích 1747 a 2113 MHz objevují záporné hodnoty útlumu, které značí vzniklý zisk signálu oproti kalibrované hodnotě výkonu signálu bez překážky. Celkový průměr útlumu na měřených frekvencích se pohybuje okolo 4,2 dB.

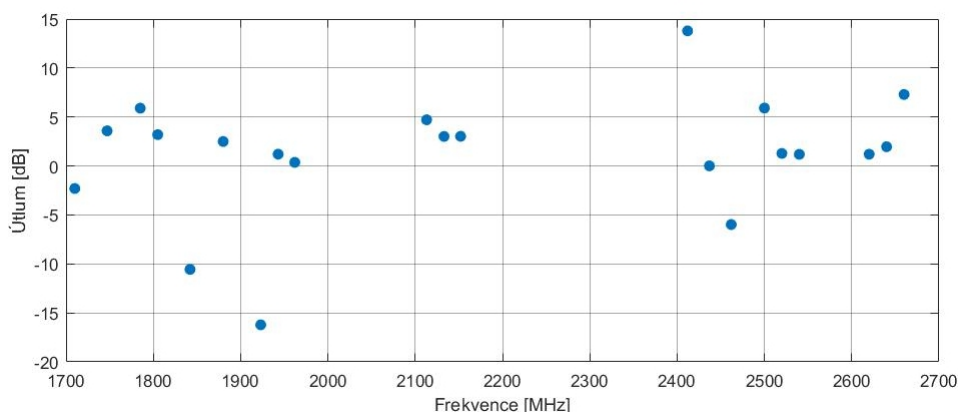
Tabulka 8.1: Naměřené hodnoty útlumu pro sádrokartonovou desku s optimalizací plechovým profilem

Měřená frekvence [MHz]	Útlum [dB]
1710	0,41
1747	-3,71
1785	2,95
1805	2,96
1842	1,34
1880	8,55
1923	3,97
1943	1,3
1962	2,05
2113	-1,95
2133	5,52
2152	3,12
2412	5,86
2437	2,42
2462	5,78
2500	3,66
2520	6,02
2540	5,44
2620	4,84
2640	7,98
2660	5,7
Celkový průměr	4,2

8.1.2 Optimalizace mezikusem

Pro tuto sadu měření útlumu přes sádrokartonovou překážku jsem využil vytvořeného mezikusu o tloušťce 1,25 cm, která se vloží mezi oba boxy. Při výměně tohoto mezikusu není potřeba manipulací s měřícím pracovištěm, což by mělo přispět ke zpřesnění měření. Naměřené hodnoty pro dané frekvence jsou vypsány v příloze B v tabulce B.1 a znázornění naměřeného útlumu na frekvenčních nosných pak na obrázku 8.2. Celkový průměr útlumu se vypočítal pouze z kladných hodnot, které určují útlum signálu.

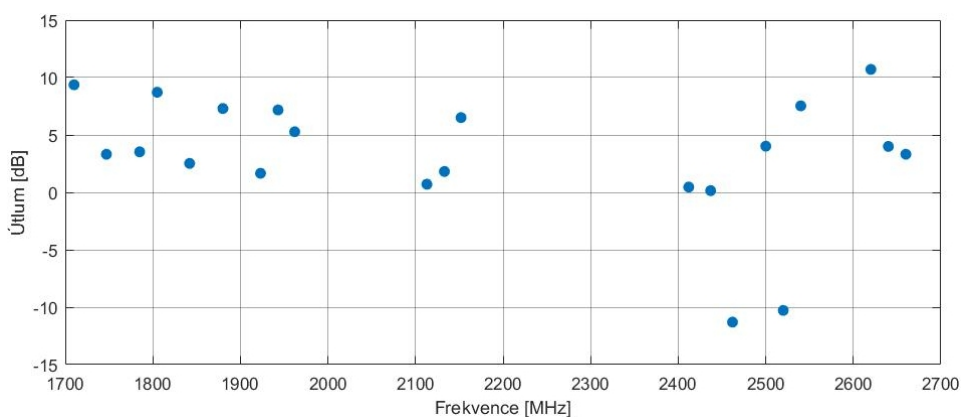
Výsledky měření s mezikusem ukazují hned čtyři naměřené zisky na frekvencích 1710, 1842, 1923 a 2462 MHz. Opačným extrémem je útlum o hodnotě 13,79 dB na frekvenci 2412 MHz. Když vezmeme v potaz ostatní naměřené hodnoty na ostatních frekvencích, tak se útlum pohybuje v rozmezí 0-7,3 dB na poslední měřené frekvenci 2660 MHz. Při zprůměrování všech útlumů vyjde průměr okolo 1,76 dB, což je hodnota o zhruba 2,5 dB nižší, než při měření s plechovým profilem.



Obrázek 8.2: Znázornění naměřených útlumů přes sádrokartonovou desku s optimalizací přidavným mezikusem

8.2 Měření útlumu dvou sádrokartonových desek

Útlum dvou sádrokartonových desek se měřil jako doplněk k měření útlumu jedné sádrokartonové desky. Cílem bylo zjistit, jakým způsobem se utlumí signál při průchodu dvěma za sebou položenými deskami. Nastavené parametry analyzátoru pro uvedená měření jsou shodná s parametry nastavenými v kapitole 7.3.2. Měřila se jedna sada měření za pomoci vkládaného mezikusu o tloušťce 2,5 cm. Naměřené hodnoty pro dané frekvence jsou vypsány v příloze B v tabulce B.2 a znázornění naměřeného útlumu na frekvenčních nosných pak na obrázku 8.3. Celkový průměr útlumu se vypočítal pouze z kladných hodnot, které určují útlum signálu.



Obrázek 8.3: Znázornění naměřených útlumů přes dvě sádrokartonové desky s optimalizací přidavným mezikusem

Stejně jako u předchozích měření s jednou sádrokartonovou deskou se hodnoty naměřené na jednotlivých frekvencích liší ve velkém rozmezí. Objevují se zde vysoké ziskové hodnoty na frekvencích 2462 a 2520 MHz, nejvyšším naměřeným útlumem je 10,71 dB na frekvenci 2620 MHz. Celkový průměr útlumu se pohybuje okolo 4,63 dB, což je hodnota velmi podobná průměru

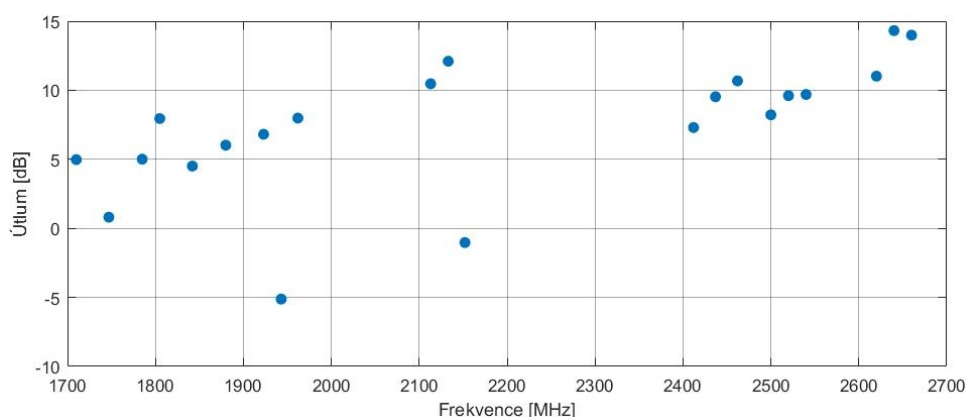
jednoho sádrokartonu při měření s optimalizací pracoviště pomocí plechového profilu. Co se týče srovnání s měřením sádrokartonové desky s optimalizací pomocí mezikusu je tato průměrná hodnota o téměř 3 dB větší.

8.3 Měření útlumu dřevěné desky

Stejně jako u sádrokartonové desky jsem měřil útlum pomocí spektrálního analyzátoru pomocí nastavení popsaného v kapitole 7.3.2 a za pomoci optimalizačních prvků typu plechového profilu nastaveného na tloušťku překážky 2,5 cm a přídatného mezikusu o šířce 2,5 cm vkládaného mezi oba boxy.

8.3.1 Optimalizace plechovým profilem

Pro tuto sadu měření útlumu přes dřevěnou překážku jsem využil pomocného plechového profilu vloženého do vnitřního prostoru obou boxů. Profil pak při kalibraci simuluje tloušťku překážky. Naměřené hodnoty pro dané frekvence jsou vypsány v tabulce B.4 a znázornění naměřeného útlumu na frekvenčních nosných pak na obrázku 8.4.



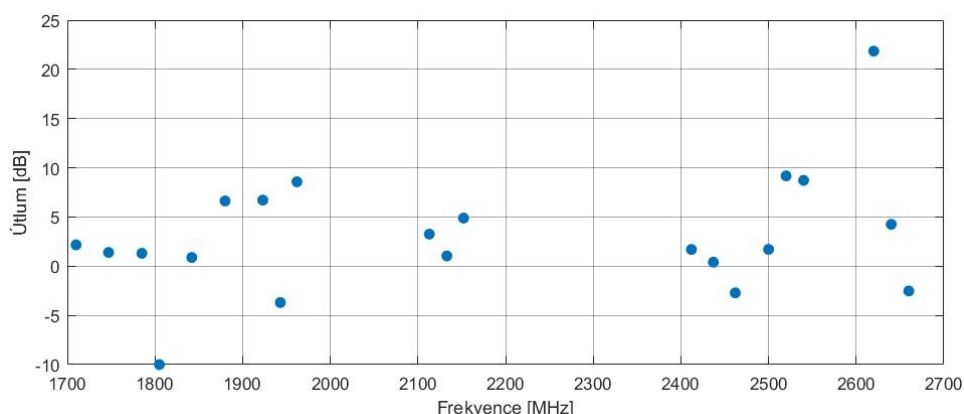
Obrázek 8.4: Znázornění naměřených útlumů přes dřevěnou desku s optimalizací plechovým profilem

Z naměřených výsledků můžeme pozorovat dvě ziskové hodnoty pro frekvence 1943 a 2113 MHz. Když pominu tyto frekvence, tak se útlum se zvětšující frekvencí postupně zvětšuje. Na frekvencích 2640 a 2660 MHz lze pozorovat velmi vysoký útlum o hodnotách 14,32, resp. 13,99 dB, což už jsou velmi vysoké hodnoty pro tento typ překážky. Průměrný útlum se pohybuje okolo 8,47 dB, což je poměrně vysoká hodnota na tento typ překážky.

8.3.2 Optimalizace mezikusem

Pro tuto sadu měření útlumu přes dřevěnou překážku jsem využil mezikusu vloženého mezi měřicí komory. Použil jsem tedy mezikus o tloušťce 2,5 cm. Naměřené hodnoty pro dané frekvence

jsou vypsány v tabulce B.5 a znázornění naměřeného útlumu na frekvenčních nosných pak na obrázku 8.5.



Obrázek 8.5: Znázornění naměřených útlumů přes dřevěnou desku s optimalizací mezikusem

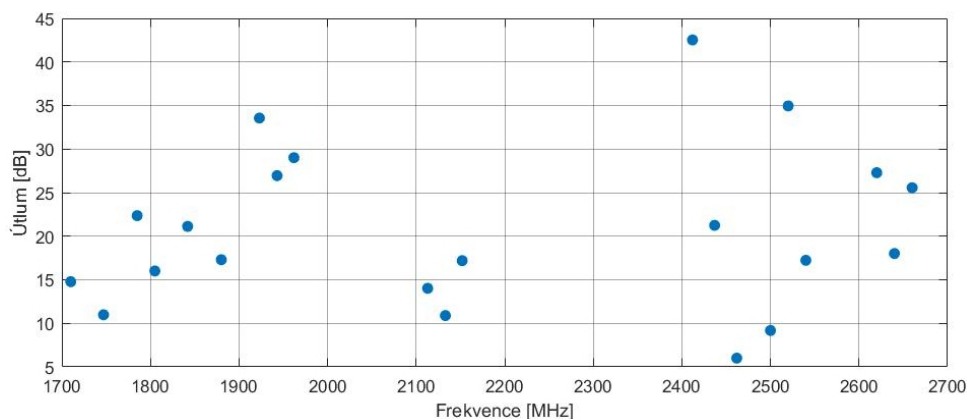
Z grafu lze pozorovat čtyři různé frekvence, na nichž se objevil zisk při průchodu signálu překážkou. Jsou to frekvence 1805, 1943, 2462 a 2660 MHz. Díky výsledkům tohoto měření již nelze dobře pozorovat postupné zvětšování útlumu stejně jako na grafu č. 8.4. Na frekvenci 2620 MHz byla zjištěna velmi vysoká hodnota útlumu 21,85 dB. Celkový průměr útlumů byl vypočítán na 4,98 dB, což je velmi podobná hodnota jako průměr dvou sádrokartonových desek (stejná tloušťka překážek).

8.4 Měření izolačního dvojskla

U tohoto typu materiálu, izolační pokovené dvojsklo, se očekávala nejvyšší hodnota průměrného útlumu ze všech mnou měřených překážek. Nastavené parametry analyzátoru pro uvedená měření jsou shodná s parametry nastavenými v kapitole 7.3.2. Měřila se jedna sada měření za pomoci vkládaného mezikusu o tloušťce 2,5 cm. Dvojsklo bylo vždy vloženo tak, aby pokovená strana byla natočena směrem k vysílači.

Naměřené hodnoty pro dané frekvence jsou vypsány v příloze B v tabulce B.3 a znázornění naměřeného útlumu na frekvenčních nosných pak na obrázku 8.6. Celkový průměr útlumu se vypočítal pouze z kladných hodnot, které určují útlum signálu.

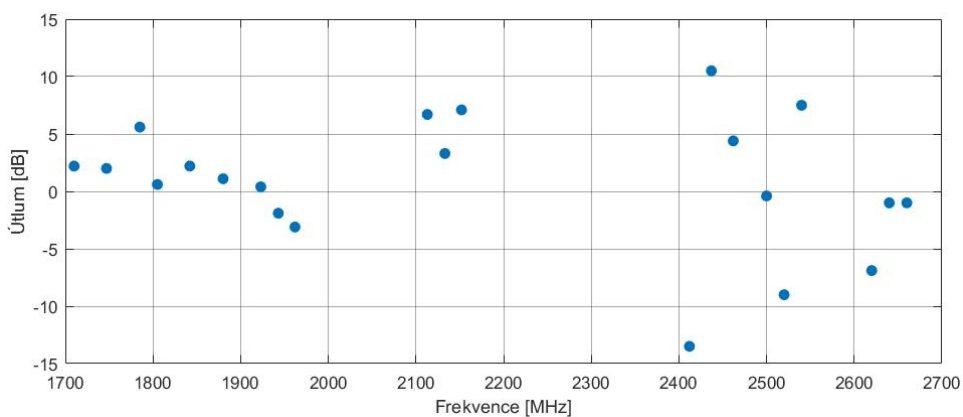
Při této sadě měření byly naměřeny pouze kladné hodnoty, tedy útlum. I v tomto případě se výsledky chovají náhodně, v grafu není vidět žádný náznak lineárního zvyšování útlumu směrem k vysokým frekvencím, jak by to dle očekávání mělo být. Nejmenší naměřený útlum je 6,01 dB na frekvenci 2462 MHz. Nejvyšší hodnota pak vyšla okolo 42,53 dB na frekvenci 2412 MHz. Celkový průměrný útlum vyšel 20,77 dB.



Obrázek 8.6: Znázornění naměřených útlumů přes izolační dvojsklo s optimalizací mezikusem

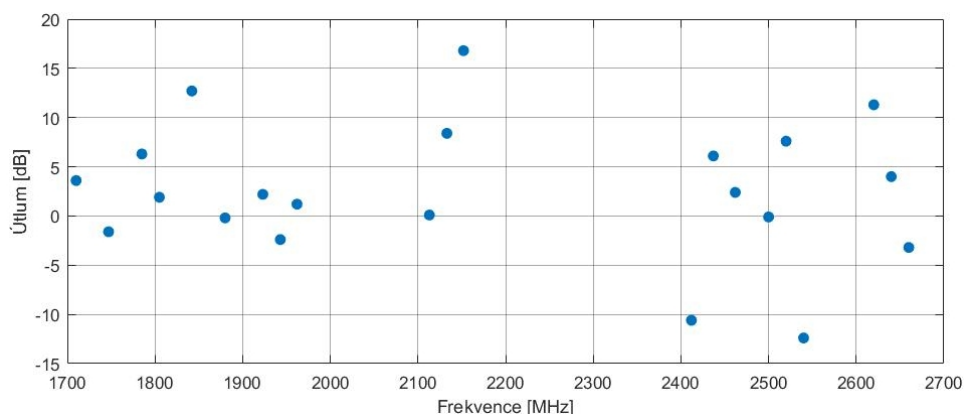
8.5 Měření metodikou signálového generátoru a spektrálního analyzátoru

Měření touto metodikou proběhlo pouze pro sádrokartonovou a dřevěnou překážku pomocí optimalizace plechovým profilem. Tuto sadu měření můžeme brát jako doplňkovou k metodice s použitím pouze analyzátoru. Zde je využit signálový generátor, který dokáže generovat rádiový signál v celém měřeném frekvenčním spektru. Jako parametry pro měření analyzátozem a signálovým generátorem se využívali parametry nastavené v kapitolách 7.3.2 a 7.3.3. Naměřené hodnoty se nacházejí v příloze B, v tabulkách B.6 a B.7, grafy znázorňující naměřené útlumy na frekvenčních nosných jsou naznačeny v 8.7 a 8.8.



Obrázek 8.7: Znázornění naměřených útlumů přes sádrokartonovou desku - metodika se signálovým generátorem

Co se týká sádrokartonové i dřevěné desky, je z grafu vidět, že při měření s externím signálovým generátorem nastávají podobné problémy jako u metodiky s dvou portovou kalibrací. Hodnoty útlumu se mění přes měřené spektrum skokově, navíc se zde objevuje více frekvencí, kde se namísto útlumu objevil zisk. Tato metodika tedy trpí podobnou chybou měření jako druhá metodika.



Obrázek 8.8: Znázornění naměřených útlumů přes dřevěnou desku - metodika se signálovým generátorem

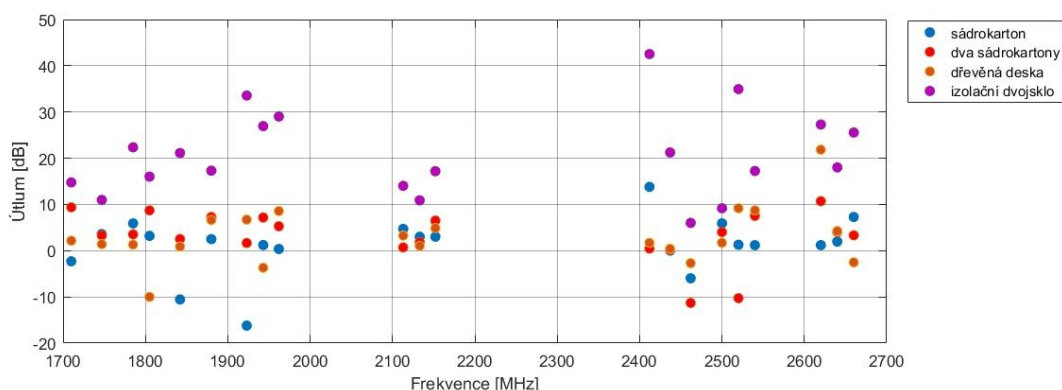
U sádrokartonové desky se nejdříve pohybujeme v relativně očekávaném rozmezí pro útlum sádrokartonu na frekvencích od 1710-1880 MHz. Poté se ale na frekvencích přes 2000 MHz začnou vyskytovat velké výkyvy v naměřených hodnotách. Průměr útlumu jsem vypočítal na 4,12 dB, což je velmi podobná hodnota jako při měření pomocí dvou portové kalibrace a za pomoci optimalizace plechovým profilem.

U dřevěné desky se větší výkyvy objevují již od začátku samotného měření. Nejvyšší hodnota útlumu se pohybuje okolo 16,8 dB na frekvenci 2133 MHz, největší zisk (-12,4 dB) se zase projevil na frekvenci 2540 MHz. Celkový průměrný útlum je 6,2 dB.

9 Vyhodnocení naměřených dat

Pomocí měřicího pracoviště bylo naměřeno několik sad měření pro každou z vytipovaných překážek. Výsledky měření a jejich základní popsání se nacházejí v předchozí kapitole. Podle výše poskytnutých grafů se dá usuzovat, že měření útlumu v pásmu ultra krátkých vln, které je velmi citlivé na jakékoliv posuvy pracoviště nebo měřících komponentů, je složitě optimalizovaná disciplína. Každá z překážek by měla na měřených frekvencích vykazovat určitý útlum, který by se v ideálních podmínkách zvyšoval se zvětšující se frekvencí.

Na obrázku 9.1 je znázorněn graf pro všechny typy měřených překážek. Do tohoto grafu jsem vybral pouze útlumy, které byly měřeny dle optimalizace vkládanými mezikusy.



Obrázek 9.1: Znázornění naměřených útlumů pro všechny typy překážek - optimalizace pomocí mezikusu

Ze zobrazeného grafu lze vypožorovat, že útlum sádrokartonových překážek a dřevěné překážky se pohybují v navzájem podobných rozmezích. Mnohem větší útlum byl naměřen pro pokovené izolační dvojsklo. Na frekvencích 1710–1880 MHz, na který fungují GSM 1800 i LTE 1800, se objevují velké výkyvy útlumu pro všechny překážky včetně velkých naměřených zisků na určitých frekvencích. Oproti dvěma sádrokartonům položeným za sebou má jedna sádrokartonová deska větší výkyvy během měření, ale v zásadě má nižší průměrný útlum. Naměřené hodnoty dřevěné desky ukazují nižší hodnoty útlumu na frekvencích do 1800 MHz, ale poté se začnou zvyšovat na hladinu podobné jako pro dva sádrokartony.

Pro měření uplink kanály systému UMTS 2100 FDD, ve frekvenčním rozmezí 1923–1962 MHz, mají naměřené útlumy velkou chybu měření, kdy se například pro sádrokartonovou desku na frekvenci 1923 MHz naměří zisk o hodnotě 16,22 dB, což je vůbec nejvyšší naměřený zisk. Na těchto frekvencích mají dva sádrokartony a dřevěná deska vyšší hodnoty útlumu než jednotlivý sádrokarton. Na frekvencích 2113–2152 MHz, což jsou downlink kanály služby UMTS 2100 FDD, se trend obrátil a sádrokartonová deska měla v průměru vyšší hodnoty útlumu než dřevo a dvě sádrokartonové desky. Útlumy jsou si ale sobě hodně podobné v rozmezí 0,71–6,5 dB. U izolačního dvojskla došlo na těchto frekvencích k poklesu útlumu oproti frekvencím uplink kanálů.

Pro měření Wi-Fi jsem využil tři kanály na frekvencích 2412, 2437 a 2462 MHz. Na těchto frekvencích se objevovaly největší výkyvy útlumu ze všech měřených technologií. Pro frekvenci 2412 MHz byly naměřeny nejvyšší útlumy pro dvojsklo a sádrokarton, zato pro dva sádrokartony a dřevěnou desku zde byly naměřeny nízké útlumy. Pro frekvenci 2437 MHz byly naměřeny útlumy v rozmezí 0,01–0,41 dB. Pro izolační dvojsklo pak větší útlum 21,25 dB. Pro frekvenci 2462 MHz se pro sádrokartonové a dřevěné překážky naměřily ziskové hodnoty, pro izolační dvojsklo zase vůbec nejmenší hodnota útlumu a to 6,01 dB.

Poslední část frekvencí, 2500–2660 MHz, se využívají pro technologii LTE 2600. I zde nastávají velké výkyvy v měření především u dřevěné desky na frekvenci 2620 MHz, kde byl naměřen útlum 21,85 dB. Při měření sádrokartonové desky byly hodnoty útlumu v rozmezí od 1–2 dB, kromě frekvencí 2500 a 2660 MHz. Dvě sádrokartonové desky a dřevěná překážka pak měly odchylky při měření útlumu, kdy se hodnota útlumu může mezi vybranými kanály změnit i o 15 dB.

Výsledné průběhy útlumů tak potvrzují velmi velkou chybu v měření v laboratorních podmínkách a za použití sestaveného měřicího pracoviště. Pro budoucí využití měřicích boxů by se nemělo stávat, že při měření dvou frekvencí vzdálených od sebe např. 20 MHz naměříme útlumy o rozdílu např. 10 dB. Přitom se zde takový případ chyby objevuje hned několikrát.

Hlavním důvodem je náchylnost UHF rádiových vln na jakékoliv změny okolního prostředí a interakcí se signály vysílaných na stejných frekvencích. Z těchto důvodů se vymýšlela optimalizace pracoviště tak, aby při měření bylo nutné pohybovat s boxy co možná nejméně. Dále je nutné brát potaz vysílání na měřených frekvencích. Zde nejvíce ovlivňovalo především vysílání Wi-Fi v pásmu 2,4 GHz, kterým je pokryta celá budova FEI včetně laboratoře, kde probíhalo měření. K ovlivnění výsledků měření mohl také zapůsobit typ použité antény, jejichž vyzařovací charakteristika je všesměrová a díky této vlastnosti procházejí překážkou také odražené vlny. K eliminaci tohoto jevu by pomohlo měřicí pracoviště obložené absorbéry.

9.1 Srovnání s očekávanými výstupy

V tabulce 9.1 jsou stanoveny průměrné hodnoty útlumu jednotlivých překážek v proměřeném pásmu UHF. Do této tabulky počítám jen s hodnotami, které byly naměřeny pomocí mezikusů. Nejmenší průměrný útlum má sádrokartonová deska, dřevěná deska a dvě sádrokartonové desky za sebou pak mají průměrný útlum o 3 dB vyšší. Útlum izolačního dvojskla je pak vysoký, 20,77 dB.

Pro vyhodnocení těchto výsledků pak bude vhodné je porovnat s již dříve naměřenými daty ve stejném proměřovaném pásmu jako jsem zpracovával já, tedy pásmo UHF. Vyhledal jsem několik zdrojů z různých institucí, které by měřili podobné překážky a v pásmu ultra krátkých vln. Většina zdrojů měřila na frekvenci 2,4 GHz nebo proměřovali celé pásmo UHF.

První zdroj pochází z Národního institutu standardů a technologií NIST (*National Institute of Standards and Technology*), což je laboratoř měřicích standardů ministerstva obchodu USA. Tento dokument se nazývá *Electromagnetic Signal Attenuation in Construction Materials* a

Tabulka 9.1: Průměrné hodnoty útlumu pro jednotlivé překážky a při měření s optimalizací pomocí mezikusu

Typ překážky	Průměrný útlum [dB]
Sádrokarton	1,77
Dva sádrokartony	4,64
Dřevěná deska	4,98
Izolační dvojsklo	20,77

pochází z roku 1997 [35]. Zde jsem našel referenční údaje pro sádrokartonovou desku a dřevěnou desku. Součástí tohoto dokumentu jsou i naměřená data o skle, ale zde bylo použito čirá skla o tloušťkách 5,7–18,6 mm. O čířm sklu je známo, že způsobuje pouze nepatrný útlum, v mé práci jsem proto použil pokovené sklo, kde je útlum mnohem více uplatňuje.

Parametry a útlumy materiálu jsou následující:

- Sádrokartonová deska o rozměrech 1006x1006x12,7 mm, pro frekvence od 1,5 až 3 GHz se útlum pohybuje od 0,4 do 0,5 dB
- Dřevěná deska o rozměrech 1143x1120x37 mm, jádro materiálu z jedle, pro frekvence od 1,5 GHz až 3 GHz se útlum pohybuje od 3 do 4 dB

Dle tohoto zdroje je průměrný útlum sádrokartonové desky stejné tloušťky vyšší o 1,27 dB. Dřevěná deska je tady však o 12 mm tlustší a je vyrobena z jiného typu dřeva (jedle má o něco vyšší hustotu než smrkové dřevo). I přes tyto skutečnosti vyšel průměrný útlum o 1–2 dB vyšší, než je naměřený útlum tohoto zdroje.

Druhým zdrojem je dokument *Propagation Losses Through Common Building Materials 2.4 GHz vs 5 GHz*. [36] Zde se porovnávají útlumy pro různé překážky a pro frekvence 2,4 a 5 GHz. Stejně jako u předchozího lze využít hodnoty pro sádrokarton a dřevo. Parametry překážek a hodnoty útlumu jsou následující:

- Sádrokartonová deska o tloušťce 12,8 mm s útlumem na frekvenci 2,4 GHz o hodnotě 0,497 dB
- Dvě dřevěné desky položené za sebou o tloušťce 37,7 mm, jádro materiálu z jedle, útlum na frekvenci 2,4 GHz se rovná 2,789 dB

Zjištěné hodnoty tohoto zdroje odpovídají zdroji č.1. Průměrná hodnota sádrokartonové desky, kterou jsem měřil já je o 1,3 dB větší. U dřevěné desky jsem naměřil hodnotu o 2,2 dB vyšší.

Další zdroj uvádí hodnoty útlumu pro několik druhů překážek na frekvenci 2,4 GHz [37]. Bohužel v tomto dokumentu se neuvádí rozměry překážek. Hodnoty je třeba brát jako orientační. Parametry překážek a hodnoty útlumu jsou následující:

- Sádrokarton na frekvenci 2,4 GHz s útlumem 3-4 dB
- Izolační dvojsklo na frekvenci 2,4 GHz s útlumem 13 dB

V tomto zdroji je pro sádrokartonovou desku uveden vyšší útlum než v předchozích zdrojích, v případě průměrného útlumu změřeného měřícím pracovištěm je asi o 2 dB vyšší. Pro izolační sklo jsem naměřil průměrnou hodnotu o zhruba 7 dB vyšší než v tomto zdroji.

Jako zdroj pro izolační dvojskla jsem využil dokumenty [38] a [39]. V těchto materiálech bylo měřeno několik typů skel. Pro potřeby práce bylo třeba najít údaje o izolačním dvojskle s pokovenou vnitřní stranou jednoho ze skel (double silver coating). Hodnoty útlumu se pohybují nad 30 dB, což určité měřené frekvence v této práci splňují, ale průměrná hodnota vyšla o 10 dB nižší. V těchto materiálech je měřeno u sklo bez jakéhokoliv pokovení. U těchto materiálů vycházela průměrná hodnota na maximálně několik decibelů.

10 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo vypracovat teoretickou rešerši na téma šíření rádiových vln v pásmu ultra krátkých vln, dále navrhnout a zkonstruovat měřicí pracoviště pro měření vlivu útlumu na různé typy překážek a pomocí sestaveného měřicího pracoviště a vybraným typům překážek pak změřit útlum rádiového signálu na určených frekvencích v pásmu UHF. Na závěr se v práci nachází vyhodnocení naměřených dat.

V teoretické části diplomové práce jsou nejdříve uvedeny vlastnosti a problematika šíření rádiových vln v pásmu UHF. Jsou zde popsány vlastnosti vyzařování elektromagnetického pole anténou a Fresnelovy zóny, což jsou klíčové parametry pro návrh měřicího pracoviště. Měřené mobilní technologie využívají pásma ultra krátkých vln. Toto pásmo se vyznačuje četnými odrazy od překážek, což se uplatňuje zejména v zástavbě a uvnitř v budovách. Šíření signálu v zástavbě dále ovlivňují pomalé a rychlé úniky a vícecestné šíření signálu, kdy se na přijímací straně spoje objevují nejen přímá vlna, ale i nekonečně velké množství odražených vln od překážek. Šíření signálu v budovách ovlivňuje prostorové uspořádání interiéru a rušením signálu od jiných systémů. Všechny tyto vlastnosti pak ovlivňují rádiový signál a způsobují útlum. Složitější situace v zástavbě jsou pak popsány modely šíření vln v mikrobeuňkách a pikobeuňkách.

Měřicí pracoviště bylo navrženo jako dvojice totožných boxů vyrobených s pozinkovaného plechu, mezi které se poté vloží překážka. Tato konstrukce pak způsobuje to, že se pracoviště chová jako vlnovod. Původně zamýšlený návrh na sestavení měřicího boxu, kde by byly vnitřní stěny obloženy absorpčními materiály se ukázala jako velmi drahá a zejména z tohoto důvodu se tento návrh neuskutečnil. Při návrhu konstrukce bylo potřeba dbát na korektní rozměry s ohledem na výpočet blízkého pole antény a minimálně 1. Fresnelovy zóny. Jako mezní frekvence byla vybrána 1710 MHz a podle této frekvence byly navrženy rozměry boxu.

Pro měření se vybraly tři typy překážek. Jedná se o sádrokartonovou desku, dřevěnou desku (laťovku) a pokovené izolační dvojsklo. Tento typ překážek se velmi často objevuje v interiérech budov. Měření probíhalo metodikou se spektrálním analyzátozem v síťovém režimu za pomoci dvou portové kalibrace. Druhou doplňující metodikou bylo měření se spektrálním analyzátozem a signálovým generátorem.

Při praktickém měření jsem se potýkal s faktory ovlivňujícím korektní měření útlumu přes překážky. Bylo potřeba vymyslet způsoby, jak s boxy při měření útlumu bez překážky a následně s překážkou nepohybovat, protože i nepatrný pohyb způsoboval chyby měření. Proto se vyzkoušeli dva způsoby optimalizace pracoviště. První z nich, plechový profil vkládaný dovnitř pracoviště, se ukázal jako nevhodný, hlavně z důvodu nutnosti pohybu s boxy po kalibraci. Druhým vyzkoušeným způsobem jsou dřevěné mezikusy ve stejných rozměrech jako vnitřní rozměr boxu, které se mezi boxy poté vkládají. Tento způsob eliminuje časté pohyby s pracovištěm.

Výsledky naměřené pomocí mezikusů vycházely lépe než pomocí plechového profilu. Průměrné hodnoty útlumu se pohybovaly okolo očekávaných hodnot útlumu, většinou byla mnou naměřená hodnota útlumu sádrokartonové a dřevěné překážky o 1 až 2 dB vyšší než očekávaná

hodnota. Výjimkou je izolační dvojsklo, kde jsem naměřil útlum o zhruba 10 dB nižší, než jsou uváděné hodnoty v několika různých zdrojích. Průběhy útlumu v měřeném frekvenčním spektru od 1710-2660 MHz však vykazovaly velké výkyvy měření včetně naměření zisku na určitých frekvencích při měření sádrokartonových a dřevěných desek. Očekávané lineární zvyšování útlumu nenastalo. Nejpresnější měření proběhlo na frekvencích okolo 2100 MHz. Největší výkyvy se objevovaly na frekvencích okolo 2400 MHz.

Podobná chyba měření mohla být způsobena několika faktory. Zaprvé samotné konstrukční řešení nemusí být vyhovující. Vzhledem k použité všesměrové anténě se přes překážku přenáší i odražené vlny od stěn, což může způsobovat chybu měření. Při použití vhodné a rozměrově malé směrové antény by výsledky mohly být lepší. Dalším faktorem je prostředí, kde se měřilo. Přímo v laboratoři jsou ve stěnách zabudované Wi-Fi AP, navíc může měření ovlivňovat signály telekomunikačních služeb. K objektivnějším výsledkům by mohlo dojít v případě vylepšení měřících boxů, např. pro tuto práci odmítnutými absorbéry nebo zkusit měřit v prostředí, kde nebude přítomno tolik nežádoucích vlivů.

Literatura

- [1] PECHAČ, Pavel a Stanislav ZVÁNOVEC. *Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů*. Praha: BEN - technická literatura, 2007. ISBN 978-80-7300-223-7.
- [2] DVORSKÝ, Marek. *Základy bezdrátových komunikací pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3557-0
- [3] Analýza vplyvu rádiových frekvenci na biologický objekt. *Posterius* [online]. [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://www.posterius.sk/?p=12961>
- [4] PECHAČ, Pavel. *Modely šíření vln v zástavbě*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-186-1
- [5] SCHEJBAL, Vladimír. *ŠÍŘENÍ VLN V BLÍZKÉ A VZDÁLENÉ ZÓNĚ ANTÉNY* [online]. Univerzita Pardubice [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://hajny.webpark.cz/RADAR/Schejbal.pdf>
- [6] Field Regions. *Antenna-Theory* [online]. [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://www.antenna-theory.com/basics/fieldRegions.php>
- [7] BERAN, Vlastimil. *Blízké pole dipólových antén*. Vysoké učení technické v Brně, 2010.
- [8] Fresnel zone. *Fresnel zone - Wikipedia* [online]. 2017 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel_zone
- [9] DLABAČ, Petr. *Šíření radiových vln u bezdrátových systémů*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2015.
- [10] VYSLOUŽIL, Michal. *Analytické a numerické řešení šíření EM vln v pásmu VHF a UHF po budovách*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010.
- [11] MICHALEK, Libor a Roman ŠEBESTA. *Rádiové sítě II pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3559-4.
- [12] *Duplexing Techniques TDD & FDD in Wireless Networks / Kashif Ali says...* [online]. 2010 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://www.kashif-ali.com/2010/04/01/duplexing-techniques-tdd-fdd-in-wireless-networks/>
- [13] Mobile Technologies GSM. *ETSI* [online]. 2017 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/mobile/gsm>
- [14] GSM Architecture. *Tutorial Point* [online]. [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: https://www.tutorialspoint.com/gsm/gsm_architecture.htm

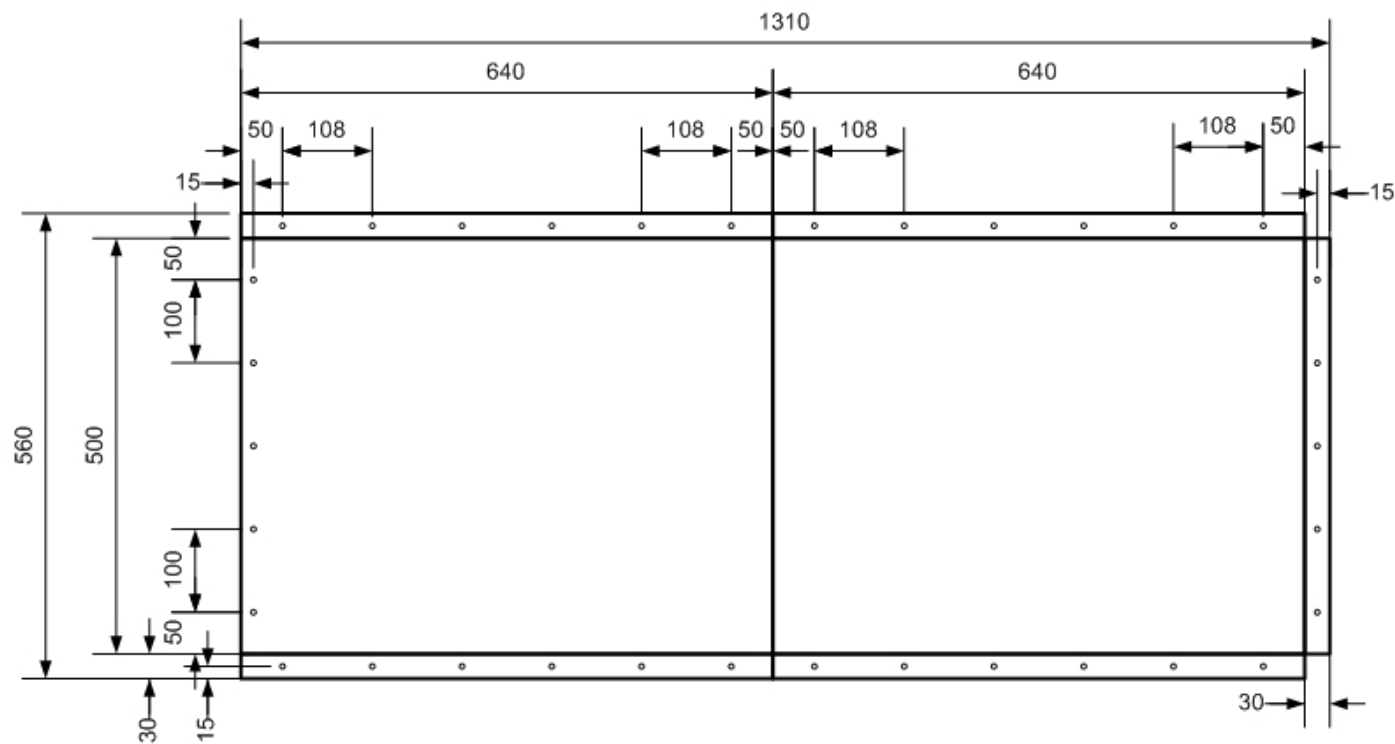
- [15] Sítě UMTS. *Access server* [online]. 2005 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2005113001>
- [16] LTE. *3GPP* [online]. 2017 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>
- [17] Wi-fi Tutorial. *Tutorial Point* [online]. 2017 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <https://www.tutorialspoint.com/wi-fi/index.htm>
- [18] ŠEBESTA, Roman a Marek DVORSKÝ. *Rádiové sítě I pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3612-6.
- [19] Pozinkované plechy. *Dekmetal* [online]. 2017 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <https://dekmetal.cz/fasadni-systemy/materialy/pozinkovane-plechy>
- [20] Bezodrazové (absorpční) prostory. *Encyklopedie EMC* [online]. Vysoké učení technické v Brně, 2004 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node48>
- [21] VOSECKÝ, Michal. *Zajištění homogenity zkušebního vysokofrekvenčního elektrického pole*. Západočeská univerzita v Plzni.
- [22] Choosing Magnetic vs. Dielectric Absorber, RF Absorbers, Microwave Absorbers | MAST Technologies. *Masttech* [online]. 2012 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://www.masttechnologies.com/magnetic-vs-dielectric-absorber-selection/>
- [23] Microwave absorbers: ECCOSORB®. Laird Technologies [online]. 2017 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://www.eccosorb.com/products-eccosorb-high-loss-absorbers.htm>
- [24] Dielectric Foam Absorbers. *Arc-Tech* [online]. 2017 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://arc-tech.com/foam/>
- [25] MF2: Lossy Foam Absorbers. *Masttech* [online]. 2017 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://www.masttechnologies.com/mf2-lossy-foam/>
- [26] EMC Ferrite tiles, flexible EM absorber sheets & pyramidal EM absorbers. *Holland Shielding* [online]. 2017 [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://hollandshielding.com/314-Ferrite%20tiles%20flexible%20absorber%20sheets%20foam%20pyramide%20absorbers>
- [27] Magnetic Absorber (MAGRAM). *Arc-Tech* [online]. 2017 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://arc-tech.com/magram/>
- [28] VF absorbéry - Měření intenzity pole - Měřicí technika, EMC. *Telemeter* [online]. 2017 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <https://telemeter.info/cz/merici-technika-emc/feldstaerke-messtechnik/hf-absorber>

- [29] Sendvičová deska laťovka. *Demos* [online]. 2017 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://www.demos-trade.cz/plosny-material/ostatni-plosne-materialy/latovka.html>
- [30] Izolační skla. *Sklenářství nonstop* [online]. 2017 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://www.sklenarstvinonstop.cz/izolacni-skla.html>
- [31] Wireless frequency bands. *Niviuk* [online]. 2017 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://niviuk.free.fr/index.html>
- [32] LTE anténa s SMA konektorem , kabel RG174 2,5m. *Paoli* [online]. 2017 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <https://www.paoli.cz/antena-680-gsm-lte-nalepovaci-2-5m-sma.html>
- [33] R&S®FSH Handheld Spectrum Analyzer. *Rohde&Schwarz* [online]. 2017 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: https://www.rohde-schwarz.com/us/product/fsh-productstartpage_63493-8180.html
- [34] R&S®SMB100A RF and Microwave Signal Generator. *Rohde&Schwarz* [online]. 2017 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: https://www.rohde-schwarz.com/us/product/smb100a-productstartpage_63493-9379.html
- [35] Electromagnetic Signal Attenuation in Construction Materials. *NIST* [online]. 1997 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build97/PDF/b97123.pdf>
- [36] Propagation Losses Through Common Building Materials 2.4 GHz vs 5 GHz. Magis Networks, Inc. [online]. 2002 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: http://www.am1.us/Protected_Papers/E10589_Propagation_Losses_2_and_5GHz.pdf
- [37] RF Basics - Part 1. *Aruba Networks* [online]. 2007 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: https://community.arubanetworks.com/aruba/attachments/aruba/tkbtkb/121/1/RF-Basics_Part1.pdf
- [38] Radio and Microwave Frequency Attenuation in Glass. *PPG Industries* [online]. [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: https://buyat.ppg.com/glasstechlib/128_TD-151-Radio%20and%20Microwave%20Frequency%20Attenuation%20in%20Glass.pdf
- [39] Ängskog, P., Bäckström, M., Vallhagen, B. (2015) Measurement of Radio Signal Propagation through Window Panes and Energy Saving Windows. In: Proceedings of Electromagnetic Compatibility (EMC), 2015 IEEE International Symposium on (pp. 74-79). <http://dx.doi.org/10.1109/ISEMC.2015.7256135>

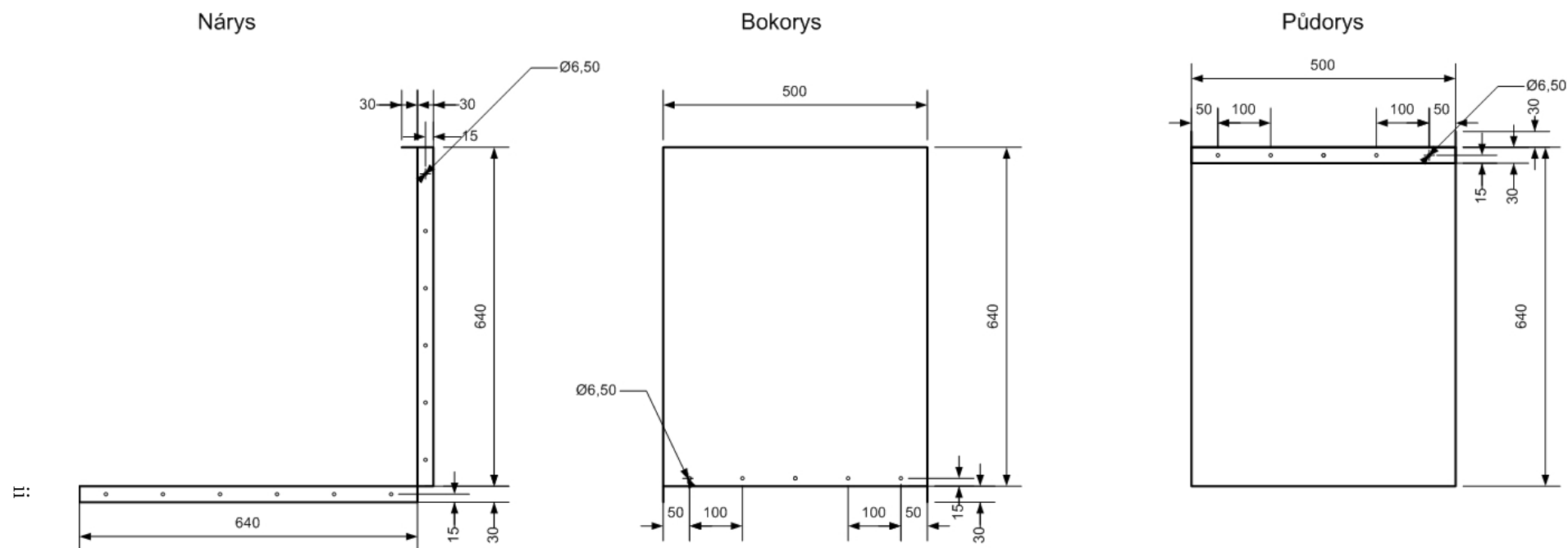
Přílohy

Příloha A: Výkresy měřícího pracoviště	i
Příloha B: Naměřené hodnoty	iv
Příloha C: Technická dokumentace antény Paoli 680	ix
Příloha D: Fotografie z měření útlumu překážek	x

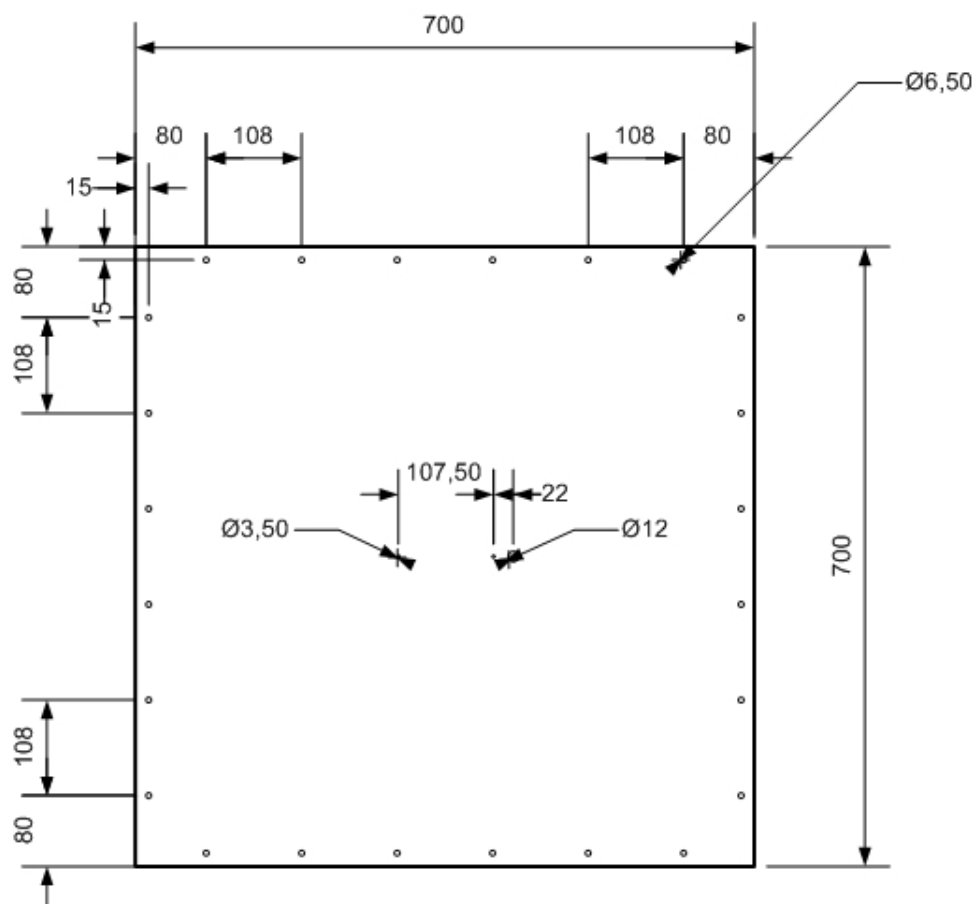
A Výkresy měřicího pracoviště



Obrázek A.1: Technický náčrt konstrukce hlavních dílů pro měřicí pracoviště



Obrázek A.2: Technický náčrt konstrukce hlavních dílů pro měřicí pracoviště



Obrázek A.3: Technický náčrt konstrukce víka měřicího pracoviště

B Naměřené hodnoty

Tabulka B.1: Naměřené hodnoty útlumu pro sádrokartonovou desku s optimalizací pomocí mezikusu

Měřená frekvence [MHz]	Útlum [dB]
1710	-2,9
1747	3,59
1785	5,9
1805	3,2
1842	-10,56
1880	2,5
1923	-16,22
1943	1,2
1962	0,37
2113	4,71
2133	3,01
2152	3,03
2412	13,79
2437	0,01
2462	-5,98
2500	5,91
2520	1,28
2540	1,19
2620	1,2
2640	1,96
2660	7,3
Celkový průměr	1,77

Tabulka B.2: Naměřené hodnoty útlumu pro dvě sádrokartonové desky s optimalizací pomocí mezikusu

Měřená frekvence [MHz]	Útlum [dB]
1710	9,37
1747	3,32
1785	3,53
1805	8,72
1842	2,52
1880	7,3
1923	1,66
1943	7,18
1962	5,28
2113	0,71
2133	1,82
2152	6,51
2412	0,46
2437	0,15
2462	-11,3
2500	4,02
2520	-10,28
2540	7,53
2620	10,71
2640	4
2660	3,32
Celkový průměr	4,64

Tabulka B.3: Naměřené hodnoty útlumu pro izolační dvojsklo s optimalizací pomocí mezikusu

Měřená frekvence [MHz]	Útlum [dB]
1710	14,78
1747	10,98
1785	22,36
1805	16,01
1842	21,13
1880	17,3
1923	33,56
1943	26,95
1962	29,01
2113	14,02
2133	10,89
2152	17,19
2412	42,53
2437	21,25
2462	6,01
2500	9,18
2520	34,95
2540	17,24
2620	27,29
2640	18,01
2660	25,56
Celkový průměr	20,77

Tabulka B.4: Naměřené hodnoty útlumu pro dřevěnou desku s optimalizací plechovým profilem

Měřená frekvence [MHz]	Útlum [dB]
1710	4,98
1747	0,81
1785	5,01
1805	7,95
1842	4,51
1880	6,02
1923	6,81
1943	-5,12
1962	7,98
2113	10,47
2133	12,1
2152	-1,03
2412	7,3
2437	9,53
2462	10,68
2500	8,22
2520	9,61
2540	9,69
2620	11,02
2640	14,32
2660	13,99
Celkový průměr	8,47

Tabulka B.5: Naměřené hodnoty útlumu pro dřevěnou desku s optimalizací pomocí mezikusu

Měřená frekvence [MHz]	Útlum [dB]
1710	2,17
1747	1,4
1785	1,31
1805	-10
1842	0,89
1880	6,63
1923	6,71
1943	-3,7
1962	8,57
2113	3,26
2133	1,04
2152	4,89
2412	1,7
2437	0,41
2462	-2,71
2500	1,71
2520	9,18
2540	8,72
2620	21,85
2640	4,25
2660	-2,52
Celkový průměr	4,98

Tabulka B.6: Naměřené hodnoty útlumu pro sádrokartonovou desku - metodika se signálovým generátorem

Měřená frekvence [MHz]	Úroveň signálu bez překážky [dBm]	Úroveň signálu s překážkou [dBm]	Útlum [dB]
1710	-2,3	-4,5	2,2
1747	-10,8	-12,8	2
1785	-8,8	-14,4	5,6
1805	-6,7	-7,3	0,6
1842	-1,2	-3,4	2,2
1880	-8,5	-9,6	1,1
1923	-21,7	-22,1	0,4
1943	-15,4	-13,5	-1,9
1962	-9,7	-6,6	-3,1
2113	-13,9	-20,6	6,7
2133	-7,6	-10,9	3,3
2152	-2,6	-9,7	7,1
2412	-21,9	-8,4	-13,5
2437	-19,2	-29,7	10,5
2462	-4,3	-8,7	4,4
2500	-14,7	-14,3	-0,4
2520	-20,4	-11,4	-9
2540	-6,5	-14	7,5
2620	-12,3	-5,4	-6,9
2640	-6,6	-5,6	-1
2660	-10,1	-9,1	-1
Celkový průměr			4,12

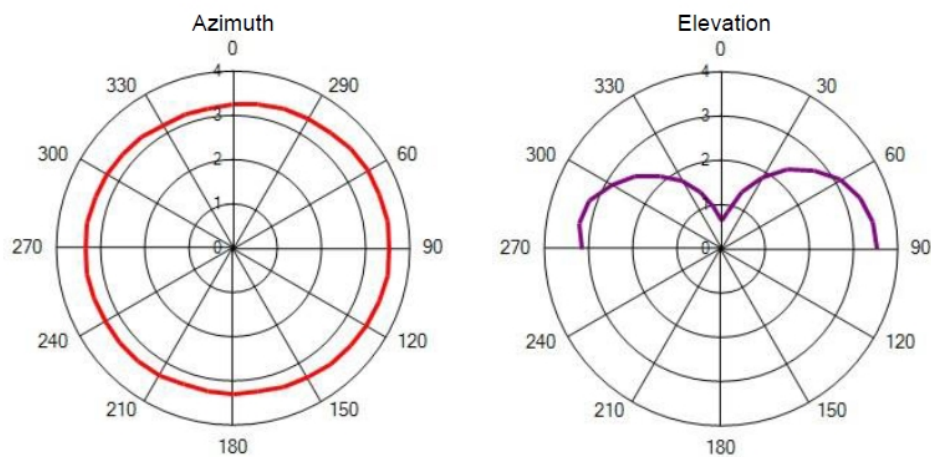
Tabulka B.7: Naměřené hodnoty útlumu pro dřevěnou desku - metodika se signálovým generátorem

Měřená frekvence [MHz]	Úroveň signálu bez překážky [dBm]	Úroveň signálu s překážkou [dBm]	Útlum [dB]
1710	-26,5	-30,1	3,6
1747	-22,7	-21,1	-1,6
1785	-17,3	-23,6	6,3
1805	-22,9	-24,8	1,9
1842	-16,2	-28,9	12,7
1880	-19,9	-19,7	-0,2
1923	-24,7	-26,9	2,2
1943	-28	-25,6	-2,4
1962	-29	-30,2	1,2
2113	-17,8	-17,9	0,1
2133	-28,5	-36,9	8,4
2152	-20,1	-36,9	16,8
2412	-19,9	-25,6	5,7
2437	-18,7	-24,8	6,1
2462	-20,5	-22,9	2,4
2500	-17,3	-17,2	-0,1
2520	-21,3	-28,9	7,6
2540	-26,6	-14,2	-12,4
2620	-21,6	-32,9	11,3
2640	-25,9	-29,9	4
2660	-28,8	-25,6	-3,2
Celkový průměr			6,2

C Technická dokumentace antény Paoli 680

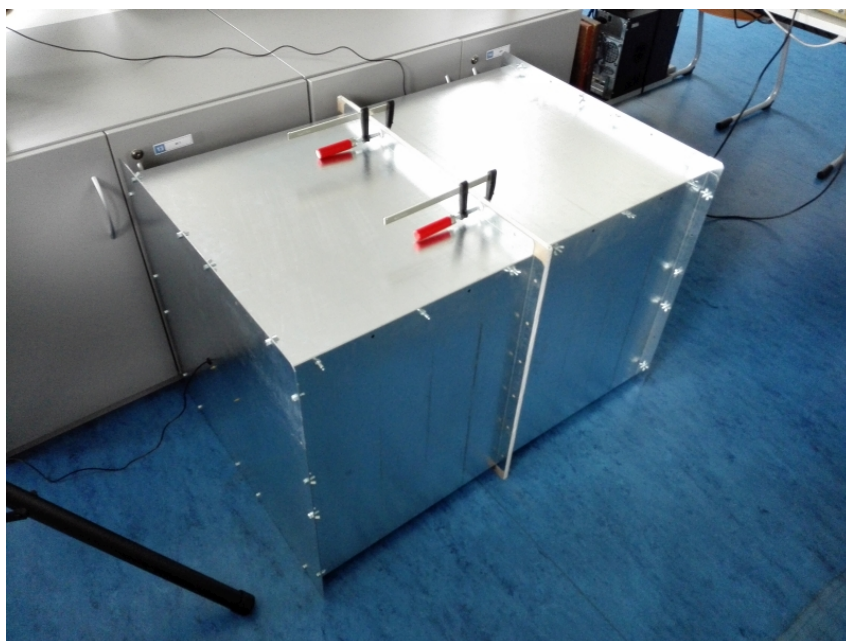
Tabulka C.1: Technické parametry Paoli 680 [32]

	PL 680
Frekvence	AMPS(824-894 MHz), GSM(900 MHz), DCS(1800 MHz), PCS(1900 MHz), 3G(2100 MHz), WiFi(2400 MHz), 4G/LTE (791-862/1710-2690 MHz)
Zisk	2 dBi
VSWR	<2.5:1
Impedance	50 ohm
Polarizace	Lineární
Příkon	50 W
Operační teploty	-40°C až +85°C
Montáž	Lepící, šroubovací
Rozměry	37,6 x 49,6 x 107,6
Konektor	SMA-m



Obrázek C.1: Vyzařovací charakteristiky antény Paoli 680 [32]

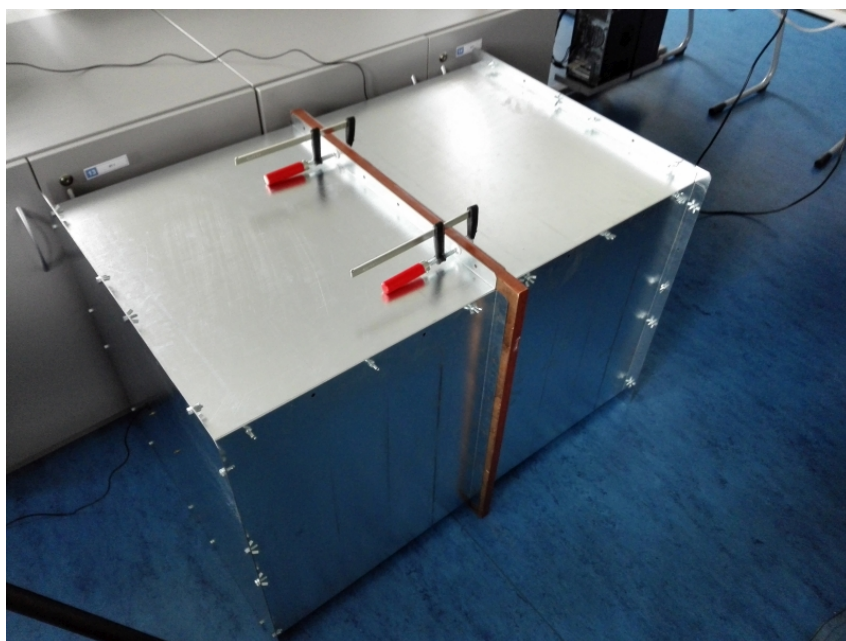
D Fotografie z měření útlumu překážek



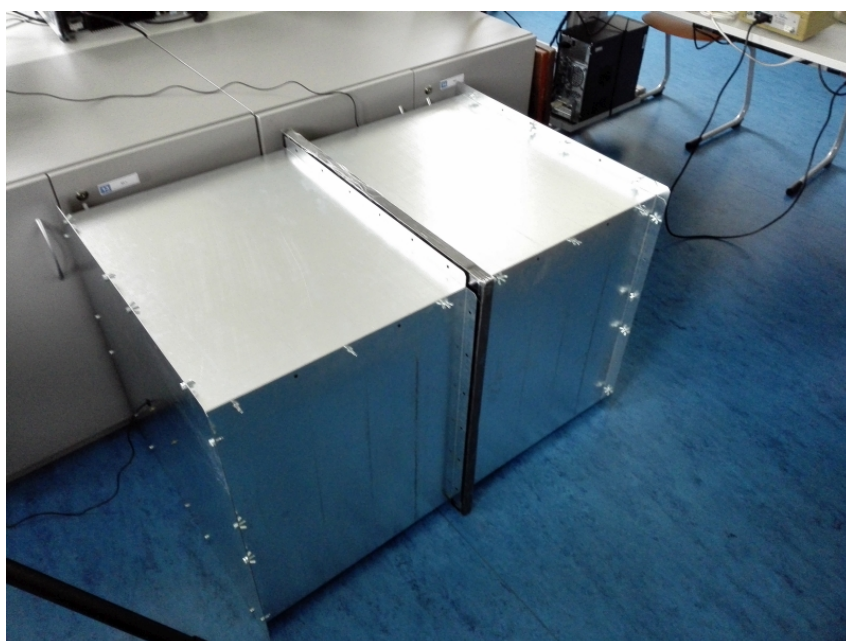
Obrázek D.1: Měření sádrokartonové překážky



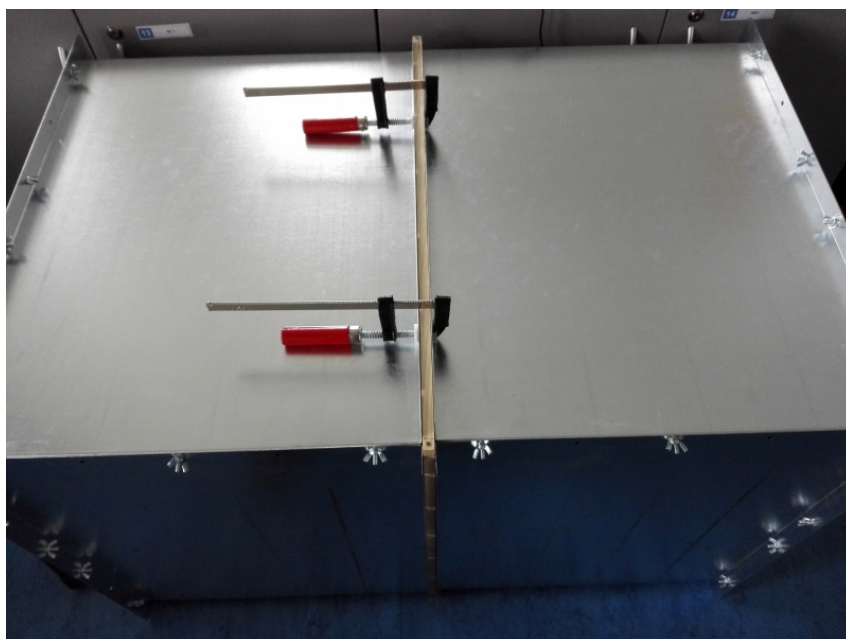
Obrázek D.2: Měření dvou sádrokartonových překážek



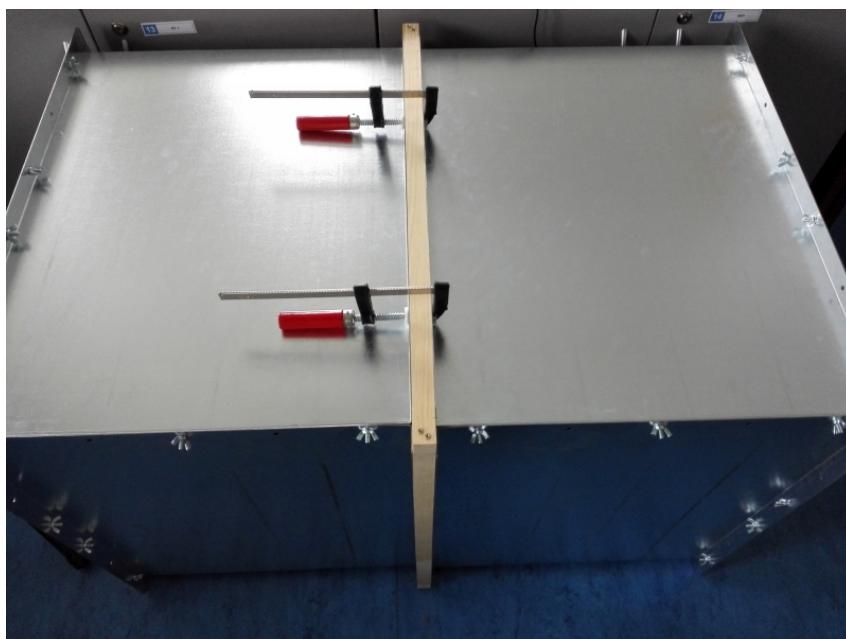
Obrázek D.3: Měření dřevěné překážky



Obrázek D.4: Měření izolačního dvojskla



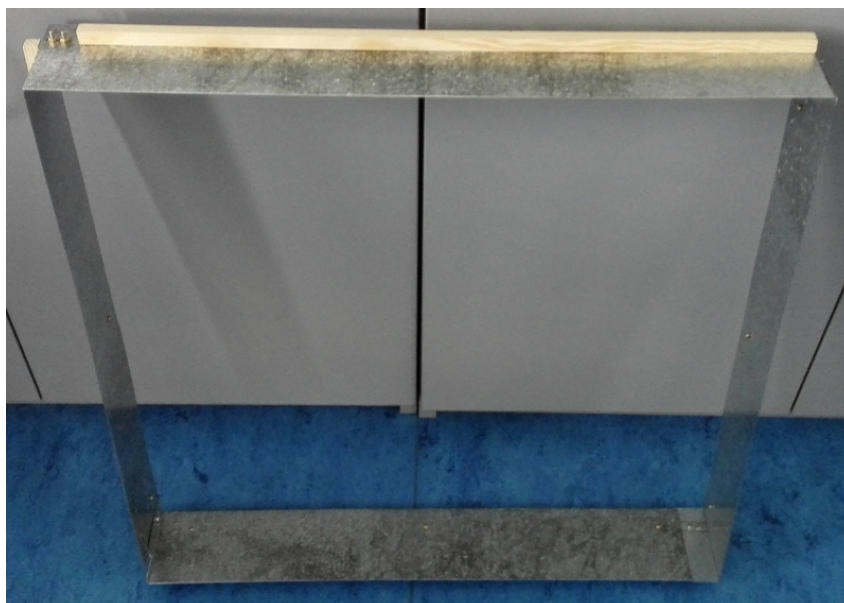
Obrázek D.5: Mezikus o tloušťce 1,25 cm vložený mezi boxy



Obrázek D.6: Mezikus o tloušťce 2,5 cm vložený mezi boxy



Obrázek D.7: Mezikus o tloušťce 1,25 cm pro simulování sádrokartonové překážky



Obrázek D.8: Plechový profil vkládající se mezi boxy